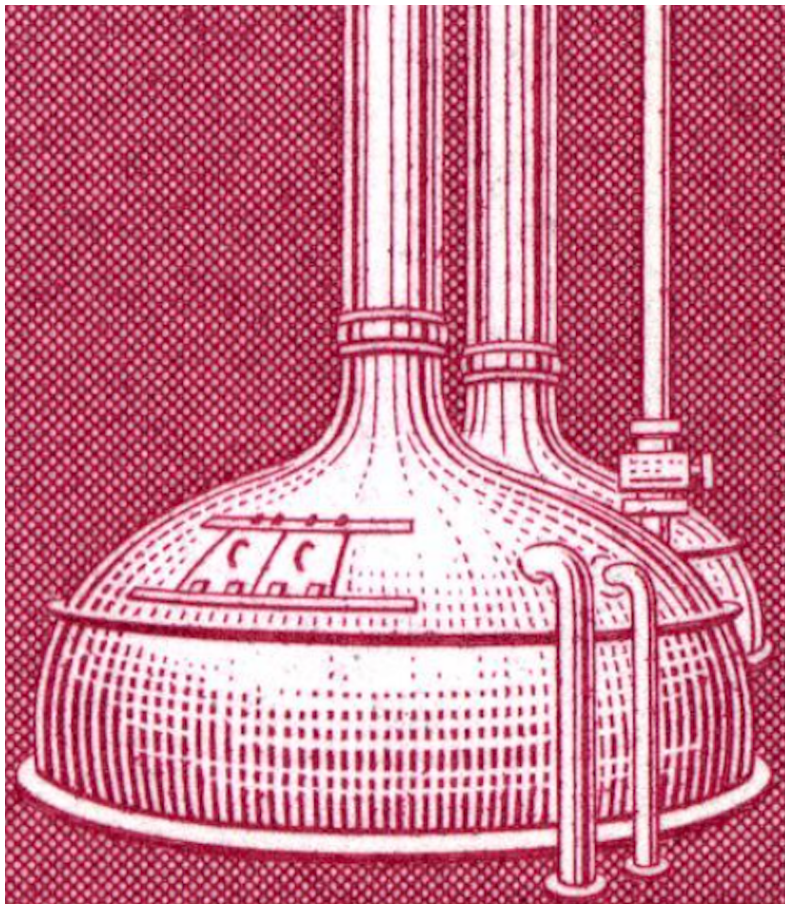


Cologne University of Applied Science – Institute for Technology and Resources
Management in the Tropics and Subtropics

MANAGEMENT THERMISCHER ENERGIEBEDARFE IN BRAUPROZESSEN



Dr. Frank Balzereit

2017

Technology and Resources Management in the Tropics and Subtropics

Cologne University of Applied Science

**ITT - Institut for Technology and Resources Management
in the Tropics and Subtropics**

„Management thermischer Energiebedarfe in Brauprozessen“

Thesis to Obtain the Degree of

MASTER OF SCIENCE

Technologie- und Ressourcenmanagement für die Tropen und Subtropen

TERMA Energiemanagement

DEGREE AWARDED BY COLOGNE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

PRESENTS:

DR. FRANK BALZEREIT

SUPERVISOR OF THESIS ITT:

PROF. DR. JOHANNES HAMHABER

SUPERVISOR IN COLOGNE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCE:

PROF. DR. KLAUS JÜRGEN LAMBERS

28.08.2017

presented by

Dr. Frank Balzereit

Student no.: 11067518

Email: frank.balzereit@gmail.com

Erklärung

von

Dr. Frank Balzereit

Ich erkläre hiermit, dass ich meine Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe, mit Ausnahme der von mir referenzierten Quellen, angefertigt habe.

Des Weiteren versichere ich, dass diese Arbeit nicht Teil eines anderen Prüfungsverfahrens ist.

Balzereit

Köln, 28.08.2017

Dr. Frank Balzereit

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung	3
1.1. Hintergrund und Relevanz der Thematik	
1.2. Ziel und Aufbau der Arbeit	
2. Der Brauprozess	6
2.1. Herstellen des Malzes aus Gerste und mahlen des Malzes	
2.2. „Maischen“ – Wasser und Malz im Maischbottich oder der Maischpfanne	
2.3. „Abläutern“ – von der Maische zur feststofffreien Pfannevoll-Würze	
2.4.a. Nebenprozess - Herstellung von Hopfenpellets	
2.4.b „Kochen“ der Würze unter Zugabe von Hopfen in der Würze- oder Sudpfanne	
2.5. „Klären“ der Ausschlagwürze im Whirlpool	
2.6. „Kühlen“ im Würzekühler	
2.7. „Gären“ mit Hefe im offenen Gärtank	
2.8. „Reifen“ des Jungbiers im geschlossenen Lagertank	
2.9. „Filtrieren“ und „Abfüllen“	
2.10. Wärme- und Kältebedarfe „Qualitativ“ mit Temperaturbereich	
3. Kühlung und Kälte	17
3.1. Was ist Kälte	
3.2. Wofür wird Kälte benötigt (Kältebedarfe)	
3.3. Kältebedarfsprofile	
3.4. Wie kann Kälte erzeugt werden – Thermodynamische Grundlage	
3.5. Techniken der Kälteerzeugung	
3.5.1. Kühlung unter Nutzung der Umgebungsbedingungen – Adiabate Verdunstungskühlung	
3.5.2. Kaltdampf-Kompressionskälteanlage	
3.5.3. (Ab-)sorptionskälteanlagen	
4. Wärme	35
4.1. Thermodynamische Qualität der Wärme	
4.2. Wärmequellen	
4.2.1. Wärmeversorgung	
4.2.2. Kraft-Wärme-Kopplung	
4.2.3. Wärmepumpen	
4.2.4. Erneuerbare Wärmequellen	

5. Wärme- und Kältebedarfe der Brauprozessschritte **45**

5.1. Prozessschritte mit Wärmebedarf

- 5.1.1. Warmluft zum Trocknen der Gerste und Darren des Malzes
- 5.1.2. Erhitzen der Maische im Maischbottich
- 5.1.3. „Abläutern“ Erhitzen des Anschwänzwassers
- 5.1.4. Aufkochen und Eindampfen der Würze in der Würzepfanne
- 5.1.5. Leichtes Abkühlen vor dem Whirlpool oder Strippen der Würze vor der Kühlung

5.2. Prozessschritte mit Kühlbedarf

- 5.2.1. Kühlen im Würzekühler
- 5.2.2. Kühlhalten im offenen Gärtank, mit Luftwechsel und Frischluftkühlung
- 5.2.3. Abkühlung des Jungbiers im geschlossenen Lagertank

5.3. Energiebedarfe im Gesamtprozess

- 5.3.1. Kältebedarfe vom Whirlpool bis zur Abfüllung (sowie zur Hopfen-Pelletierung)

6. Effizienzoptionen im Brauprozess und seiner Energie-Bereitstellung **61**

6.1. Energieeffizienzstrategie im Brauprozess

- 6.1.1. Wärme- und Kältebedarfskopplung eines ausgewählten Brauprozesses
- 6.1.2. Energieeffizienzstrategien in Brauereien – Strategien von Anbietern und aus Untersuchungen

6.2. Selbstversorgerszenario für Brauereien

- 6.2.1 BHKW in Brauereien
- 6.2.2. Wärmepumpen
- 6.2.3. Einsatzbeispiel BHKW und Wärmepumpe beim Trocknen der Darren des Malzes mit Warmluft
- 6.2.4. Erzeugung von Biogas aus Treberrückständen des Brauprozesses

7. Rückschau und Ausblick **80**

7.1. Zusammenfassung

7.2. Forschungsbedarf

- 7.2.1. Weiterzuführende Untersuchungen
- 7.2.2. Gesamtbilanz – Ökobilanz

Literaturverzeichnis **83**

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1. Hintergrund und Relevanz der Thematik

Weltweit hat sich in den vergangenen Jahren die Einsicht, den globalen anthropogenen Klimawandel als Tatsache anzuerkennen, nicht nur bei Forschern in diesem Bereich, sondern auch bei der breiten Öffentlichkeit und in der politischen Debatte durchgesetzt. Die von der Forschung prognostizierte Möglichkeit, dass der im Wesentlichen vom Menschen verursachte Anstieg der globalen Mitteltemperatur, mit seinen vielfältigen Auswirkungen auf den Meeresspiegel, auf Wetterextreme und Veränderungen der stabilen Meeres- und Windströmungen, starke Auswirkungen auf die Gesellschaften, die Wirtschaft und politische Stabilität innerhalb der globalisierten Welt haben kann, hat die starke Reduzierung der für den Treibhauseffekt verantwortlichen Emissionen, insbesondere CO₂ und Methan, zu einem der obersten propagierten Ziel vieler Nationen gemacht.

Neben dem Aspekt des Klimawandels besteht auch die Tatsache, dass die fossilen Ressourcen bei dem, mit der wirtschaftlichen Entwicklung insbesondere der bevölkerungsstarken Schwellenländer, starken Anstieg des weltweiten Energiebedarfs, nur noch eine relativ kurze Zeit zur Verfügung stehen werden und sich entsprechend verteuern. Lokale Umweltprobleme, die mit der Nutzung fossiler Brennstoffe insbesondere Kohle einhergehen, befördern den Ausbau klimaneutralerer Technologien.

Der Wechsel von den konventionellen fossilen Energieträgern (seit den Störfällen in Japans Atomreaktoren auch zunehmend den nuklearen Energieträgern) hin zu einer erneuerbaren Energieversorgung spielt dabei eine entscheidende Rolle. Die Technologien einer erneuerbaren Gewinnung elektrischer sowie thermischer Energie nehmen in verschiedenen Ländern unterschiedliche Wege. Die Energiewende in Deutschland führt von der fast ausschließlichen Nutzung fossiler Brennstoffe, wie Kohle, Erdgas und Erdöl sowie nuklearer Brennstoffe in zunehmendem Maße zu einer Substitution durch Windkraft, Solarthermie, Biogas und in geringerem Maße Photovoltaik in eine erneuerbare Zukunft. Die Geothermie und die Wasserkraft sind mit einem relativ kleinen Anteil vertreten, mit begrenzten Möglichkeiten für einen weiteren Ausbau.

Neben einem, mit der industriellen Entwicklung einhergehenden steigenden Strombedarf der Industrie und eines Anstiegs der Brennstoffversorgung für den Transport, wird ein weiterer großer Teil der weltweit benötigten Energie zur Temperierung von Gebäuden, zur Erwärmung und Kühlung von Waren (im Wesentlichen Lebensmittel) und bei Produktionsprozessen eingesetzt. Der weltweite Bedarf an Kälteenergie steigt dabei seit Jahren stärker als der Bedarf an Wärmeenergie. Steigende Komfortansprüche, die Zunahme von Wärmequellen innerhalb von Gebäuden (elektrische Geräte, Computer), architektonische Trends (Stahlbetonbauten, die keine natürliche Lüftungsstrategie vorsehen oder traditioneller Bauweise entsprechen) und möglicherweise auch die Zunahme der Außentemperaturen im Sommer erzeugen steigende Nachfragen nach Klimatisierung (Q: Henning, 2005), allerdings nur bei dem Teil der Weltbevölkerung, der sich die damit verbundenen Kosten leisten kann. Das wirtschaftliche Wachstum insbesondere in Schwellenländern und die Kombination aus Bevölkerungswachstum und steigendem Anteil der Bevölkerung die weltweit in Städten wohnt, unterstützen diesen Trend. Eine globale Vereinheitlichung der Ansprüche an ein bequemes Leben (Beispiele: Smartphone, motorisierter Individualverkehr, Klimatisierung im Wohnbereich und Automobil weltweit u.v.m.) wird insbesondere die Bedürfnisse nach Gebäudeklimatisierung insbesondere in tropischen und subtropischen Ländern in besonderem Maße ansteigen lassen.

Kältebedarfe Sektor der lebensmittelverarbeitenden Industrie werden mit steigendem Konsum anziehen, da der Bedarf für Kühlung im Wesentlichen proportional zur umgesetzten Menge der Lebensmittel und ihrer weltweiten Verteilung besteht. Die Produktion von Lebensmitteln in klimatisch wärmen und feuchten Gebieten der Erde steigt mit ihrer globalen Vermarktung, wodurch zusätzlicher Kühlbedarf auf dem Transportweg entsteht.

Der Brauprozess für Bier, der inzwischen nicht mehr nur in den Ländern des traditionellen Bierkonsums, sondern mittlerweile in Brauereien weltweit Anwendung findet, ist dafür ein gutes Beispiel. Die Herstellung des Bieres ist entlang der Prozesskette mit Wärme- und Kältebedarfen verbunden, die auf verschiedenen Temperaturniveaus miteinander gekoppelt werden können. Energieeffizienzsteigerungen einzelner Prozessschritte sowie durch Wärme- und Kältetransfer entlang der gesamten Prozesskette sind innerhalb der Brauerei möglich.

1.2. Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es,

- zunächst eine Abbildung der wesentlichen, teilweise in der Praxis sehr unterschiedlich realisierter Prozessschritte des Brauprozesses, insbesondere unter dem Aspekt der Wärme- und Kältebedarfe zu liefern,
- die Identifizierung des Effizienzpotentials in einzelnen Stationen sowie des gesamten Produktionsprozesses auf Basis der thermodynamischen Definition von Wärme und Kälte, sowie der prozessbezogenen Kopplung von Wärme- und Kältebedarfen auf ihren unterschiedlichen Temperaturniveaus,
- das Aufzeigen von Szenarien zur Bereitstellung von Energien, die dem Prozess von außen zugeführt werden müssen,
- und abschließend die Diskussion der möglichen Gründe für das Beharren von Brauereien, Änderungen des Brauprozesses zu Zwecken gesteigerter Energieeffizienz oder alternativer Versorgungskonzepte nicht umzusetzen.

Zunächst werden in Kapitel 2 die Grundprozesse des Bierbrauens dargestellt und entlang der Prozessstufen die jeweiligen Wärme- und Kältebedarfe qualitativ analysiert und zusammengefasst. Die Analyse basiert im Wesentlichen auf Veröffentlichungen im deutschsprachigen Raum. Aus einer Vielzahl von Varianten der einzelnen Prozessstufen, auch im Hinblick auf angestrebte Temperaturniveaus, wird ein typischer Temperaturverlauf herausgearbeitet, der die Basis für spätere Berechnungen liefert.

Die Kapitel 3 und 4 beschäftigen sich mit den Grundlagen zu den thermodynamischen Begriffen Kälte und Wärme, und wofür der Mensch insbesondere die Kälte benötigt. Dazu gehört die Charakterisierung und Einteilung von Kälte bezüglich ihres jeweiligen Einsatzbereichs. Daran schließen sich die thermodynamischen Grundprinzipien der Erzeugung von Kälte sowie die technischen Möglichkeiten der Erzeugung von Wärme an.

Die thermischen Prozesse zur Kälteherstellung erfordern günstige und qualitativ hinreichende Wärmequellen. In diesem Zusammenhang beschäftigt sich Kapitel 4 auch mit der Qualität von

Wärme aus thermodynamischer Sicht und woher Wärme zu beziehen ist. Der in technischen Prozessen realisierte Fall der gleichzeitigen Erzeugung von mechanischer Energie und Wärme, der als Kraft-Wärme-Kopplung bekannt ist, stellt eine thermodynamisch, also von der Theorie über die Wärme (Wärmelehre) bedeutende Form der Wärmeerzeugung dar. Eine Erweiterung stellt die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) dar, bei der Wärme auch als Antriebsleistung für einen thermischen Kältemaschinenprozess eingesetzt wird.

In Kapitel 5 wird die Analyse auf die modellhaften Produktionsabläufe in einer Brauerei in Deutschland angewendet. Dabei werden die Bedarfe aus Kapitel 2 quantitativ durch technische Kalkulationen für die einzelnen Prozessschritte bestimmt. Aus Veröffentlichungen über die Wärme- und Kältebedarfe im Brauprozess, ergibt sich bei der Analyse oftmals nur unter Annahmen ein zusammenhängendes Bild.

Im Kapitel 6 wird die Integration der einzelnen Prozessschritte in ein Konzept der Ausnutzung von prozessinternen Effizienzpotentialen für eine Rückgewinnungsstrategie vorgenommen. Es wird dabei versucht, so viele Energiebedarfe wie möglich durch Rückgewinnung aus dem Brauprozess zu decken. Der apparatetechnische Aufwand wird hierbei ökonomisch nicht betrachtet. In einem zweiten Schritt wird ein Selbsterzeuger-Szenario entworfen, wobei die Energieversorgung eine optimale Nutzung des thermodynamischen Potentials der eingesetzten Primärenergien berücksichtigen soll. Zuletzt wird kurz dargestellt, welche Gründe es bei den Herstellern für eine Beharrung auf dem bisherigen Stand der energietechnischen Strategie geben kann. Die bei einer Brauereibesichtigung und dem Interview in einer Kölner Brauerei erhaltenen Informationen liefern dafür mehrere Indizien.

2 Der Brauprozess

Der Hauptprozess bei der Bierherstellung in einer Brauerei erscheint auf den ersten Blick als recht übersichtlicher Prozess, bei dem Trinkwasser nacheinander die Zutaten Gerstenmalz, Hopfen und Hefe zugesetzt werden, dabei immer für gute Durchmischung gesorgt und verschiedene Temperaturniveaus durchlaufen und zwischendurch unerwünschte Feststoffe entfernt werden. Tatsächlich ist das Bierbrauen ein komplexer Vorgang, bei dem die biologische Aktivität insbesondere der Hefe, bei der natürlichen Umsetzung des Malzzuckers in Alkohol und Kohlendioxid, eine gut gesteuerte Prozessführung verlangt. Die Qualitäten der nicht genormten natürlichen Rohstoffe Gerstenmalz und Hopfen sind Schwankungen unterworfen, die einen entscheidenden Einfluss auf die vielfältigen Komponenten des Geschmacks und Farbe des Bieres sowie auf die Schaumfestigkeit im Glas haben. Einfluss nehmen auf diese Qualität u.a. die Witterung beim Anbau, die Erntezeit, der Ort des Anbaus und der Boden sowie die Aufzuchtspflege. Auch die Hefe beeinflusst den Geschmack des Bieres. Sie wird nach Möglichkeit in Reinkultur aus einer einzigen Zelle gezüchtet, um sicherzustellen, dass sämtliche Hefezellen später identische Eigenschaften haben (Gaffel (2017)).

Nicht zuletzt ist auch die Reinheit, nicht nur in Bezug auf das Reinheitsgebot bei den in Deutschland zulässigen Zutaten, sondern auch in Bezug auf die Verunreinigung mit Pilzen und Bakterien, insbesondere bei der Verwendung der obergärigen Hefe mit ihrer höheren Temperatur beim Gärprozess, sehr wichtig.

In Bild 2.1 sind die wesentlichen Hauptprozessschritte des Brauprozesses dargestellt.

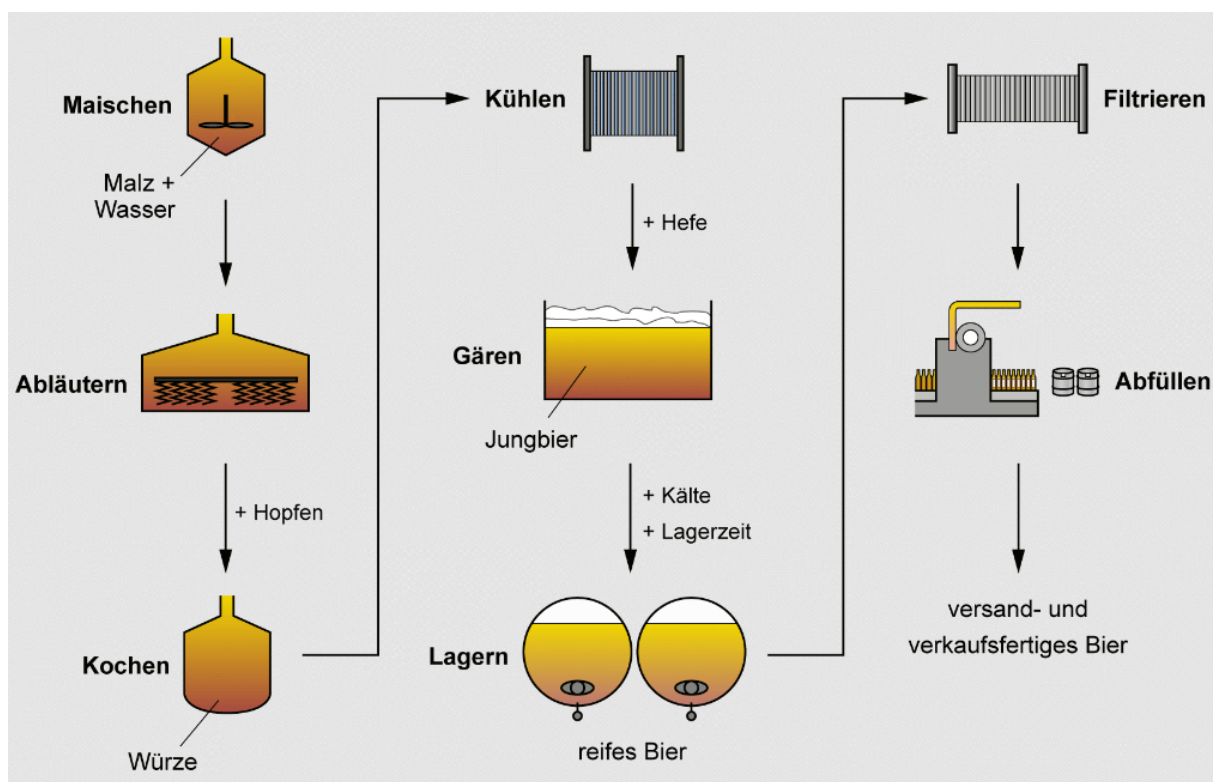


Bild 2.1: Schematische Darstellung des Brauvorgangs in einer Brauerei (Walzl; Hlatky (2014))

Vor der Vermischung des meist aus Gerste gewonnenen Malzes mit Wasser zu der sogenannten Maische, muss das Malz zunächst aus dem Getreidekorn der Gerste gewonnen werden (s. Kapitel 2.1.1.). Beim ersten Schritt des Brauprozesses durchläuft das Wasser-Malz Gemisch eine gesteuerte Erwärmung zur Anreicherung der Lösung mit dem Zucker des Malzes. Nach einer Abscheidung unlöslicher Bestandteile im anschließenden Prozess des Abläuterns, wird zunächst noch weiteres heißes Frischwasser hinzugefügt und die entstandene Würze in einem beheizbaren Bottich, auch als Pfanne bezeichnet, unter Zugabe von Hopfen gekocht. Durch das Kochen werden die enzymatischen Prozesse abgebrochen, Keimfreiheit hergestellt sowie durch Verdampfung die richtige Stammwürze des Bieres eingestellt. In einem weiteren in Bild 2.1 nicht dargestellten Schritt vor der Kühlung wird die Würze im sogenannten Whirlpool in Rotation versetzt und dadurch eine Aufkonzentrierung verbleibender Feststoffanteile und deren Absonderung aus der Würze betrieben. Anschließend wird die Würze auf die sogenannte Anstelltemperatur heruntergekühlt, bei der die je nach Biersorte zu diesem Zeitpunkt beigegebene Hefe sich im anschließenden mehrtägigen Gärungsprozess besonders wohl fühlt. Mit Beendigung der Hefeaktivitäten zum gewünschten Zeitpunkt und Entfernung des aufschwimmenden Hefeschaums (obergärige Hefe) oder der sich am Gärbottichboden absetzenden Hefe (untergärige Hefe) wird das Jungbier nach weiterer Abkühlung zur Reifung in gekühlte Lagertanks gegeben. Dieser Prozessschritt dauert bis zu mehreren Wochen. Das Filtern, Ultrahocherhitzen und anschließende Abfüllen beenden den Weg des Bieres durch die Brauerei.

Der Prozess bei der Vorbereitung des Malzes sowie das Ansetzen der Maische sind komplexere Vorgänge, als man sich anhand einfacher Beschreibungen allgemein vorstellt. Sehr detailreich sind insbesondere auch die biologischen und biochemischen Prozesse bei der Verarbeitung der Gerste und ggf. anderen Rohfrüchten zu Malz, dem Schrotten des Malzes und dem Prozess des Maischens in „Technologie Brauer und Mälzer“ von W. Kunze zusammengetragen. Ebenso ist der scheinbar einfache Vorgang des Läuterns ein hochkomplexer Vorgang, z.T. unter Einsatz sehr „ausgetüftelter“ Läuterapparate und Maischefiltersysteme. Der Blick auf die Prozesse ist in dieser Arbeit z.T. vereinfachend, auf die wesentlichen Abläufe sowie im Hinblick auf die notwendigen Energieaufwendungen dargestellt.

2.1. Herstellen des Malzes aus Gerste und mahlen des Malzes

Malz ist der Hauptrohstoff des Bieres und er wird aus Gerste hergestellt. Zur Herstellung von einem hl (Hektoliter) Bier mit einem Stammwürzegehalt von 11% benötigt man ca. 17 kg Malz.

Die Gerste wird während der „Keimruhe“, eine Zeit, in der das Korn noch nicht keimfähig ist, in Silos gelagert. Dabei kommt es abhängig vom Wassergehalt und der Lagertemperatur zur Atmung, bei der CO₂ erzeugt wird. Der benötigte Sauerstoff muss durch Belüftung zugeführt werden, um die Gerste am Leben zu erhalten. Die Atmung ist mit einem unerwünschten Stärkeverlust verbunden, sogenannter Schwand.

Der Wassergehalt sollte aufgrund der mit ihm stark ansteigenden Atmungsaktivität unter 15% betragen. Oberhalb 15% Wassergehalt muss die Gerste vor der Einlagerung getrocknet werden. Die Trocknung ist wichtig zur Erhaltung der Keimfähigkeit. Sie muss mit sehr moderaten Temperaturen geschehen, da die feuchte Gerste temperaturempfindlich ist. In der Lagerung muss sie mit der Frischluft kühl gehalten werden. Bei Wassergehalten unter 15% und Lagertemperaturen bis maximal 12°C ist die Lagerung dauerhaft ohne Schaden möglich (Kunze (2016)).

Das im Folgenden beschriebene Mälzen findet in der Mälzerei statt, die von der Brauerei selbst betrieben werden kann, oftmals jedoch in einem separaten Betrieb durchgeführt wird, wobei das für das Maischen einsatzfähige Malz von der Brauerei eingekauft wird.

Der Zweck des Mälzens besteht darin, im keimenden Gerstenkorn Enzyme zu bilden und bestimmte stoffliche Umwandlungen stattfinden zu lassen (die sogenannte Lösung oder Auflösung). Dazu wird die Gerste im ersten Schritte in Wasser geweicht, zur Aufnahme des für die Keimung notwendigen Wassers. Technologische Verfahren zur Durchführung des Keimverfahrens und das anschließende Darren gibt es heutzutage sehr viele (Kunze (2016), S. 162-175). Belüftung der Gerste mit gekühlter und befeuchteter Luft spielt dabei eine wesentliche Rolle. Die bei der Atmung der Gerste entstehende Wärme muss abgeführt werden und je nach Keimstadium eine Temperatur von zunächst maximal 17 bis 18°C, später von 12 bis 14°C gehalten werden (Kunze (2016), Bild 2.77 S. 175). Hier kommen gewöhnlich Direktverdampfer zum Einsatz. Bei kalten Umgebungstemperaturen müsste die Luft ggf. auch erwärmt werden. Während der gesamten Keimzeit soll das Keimgut einen Wassergehalt von ca. 45% behalten, so dass die Prozessluft ständig mit Wasser gesättigt sein muss. Für eine Tonne Gerste werden ca. 0,5 m³ Wasser benötigt.

Ab einem bestimmten Stadium wird die Keimung durch einen Trocknungsvorgang, das Darren, unterbrochen. Der Wassergehalt wird von über 40% auf unter 5% für die Haltbarmachung und Lagerung gesenkt. Im Malz werden die Lebensfunktionen wie Keimung und Auflösung sowie die Enzymaktivitäten eingestellt. Das gebildete Enzympotential soll allerdings für den späteren Abbau der Stärke im Sudhaus erhalten bleiben. Entsprechend schonend muss die Trocknung mittels warmer Luft durchgeführt werden, da die Enzyme insbesondere gegenüber feuchter Hitze sehr empfindlich sind. Beim Vortrocknen bis auf einen Wassergehalt von 10 bis 12% sind Temperaturen deutlich unter 50°C einzusetzen (dieser Teilprozess des Darrens wird Schwelken genannt); eine längere Dauer des Schwelkens bei niedrigen Temperaturen wirkt sich positiv auf die Geschmacksneutralität des Bieres aus. Erst bei geringer Restfeuchte darf die Temperatur beim sogenannten Abdarren je nach Bier bei 80 bis 85°C (helles „Pilsner“ Malz) oder bei 105 bis 110°C (dunkles „Münchner“ Malz) liegen (Kunze (2016), s. 187). Übliche Abdarrzeiten liegen nahe bei 5 Stunden bei 80°C und reduzieren sich bei geringerer thermischer Belastung des Malzes auf 2 bis 3 Stunden bei 85°C.

Die Sünner Brauerei in Köln, wie auch die meisten kleineren Brauereien, lassen sich das Malz fertig anliefern und halten den Prozess der Malzherstellung nicht im eigenen Hause.

Das getrocknete Malz wird nun für den darauffolgenden Prozess des Ansetzens der Biermaische in einer Schrotmühle gemahlen. Es entsteht ein grobes Mehl, der sogenannte Malzschrot und gilt als das Herz des Bieres, denn es enthält alles, was später den Gehalt und die Bierwürze ausmacht (Gaffel (2017)).

2.2. „Maischen“ – Wasser und Malz im Maischbottich oder der Maischpfanne

Das Ansetzen der Maische ist ein wichtiger Vorprozess der Bierherstellung. Dabei wird das Malzschrot mit reinem, kalkfreiem (weichem) Brauwasser im Maischbottich (Ausstattung ohne Heizung) oder der Maischpfanne (mit Beheizungsmöglichkeit), in möglichst inniger Vermischung vermengt. Beim Maischen sind im Wesentlichen zwei Verfahrensweisen üblich, welche die Erwärmung der Maische betreffen; Das Infusionsverfahren und das Dekoktionsverfahren.

Beim Infusionsverfahren, auch Kesselmaisverfahren genannt, wird die gesamte Maische in der Maischpfanne langsam und in Schritten auf die Abmaischtemperatur erwärmt. Die gesamte Maische bleibt während des Maischvorgangs zusammen (Krause (2017)).

Unter ständigem Rühren werden beim Erhitzen verschiedene Temperaturstufen erreicht und gehalten, um aus der unlöslichen Stärke des Malzes mit Hilfe gebildeter Enzyme möglichst viele vergärbare Substanzen zu bilden. Dies sind verschiedene Zucker und Dextrine sowie Eiweiße und Mineralstoffe (Gaffel (2017)). Die Temperaturstufe der sogenannten Einmaischtemperatur liegt üblicherweise bei 45 bis 50°C. Bei weiterer Erhitzung ist eine wichtige sogenannte Rast bei 60 bis 63°C, da bei dieser Temperatur wichtige enzymatische Vorgänge ablaufen. Die Verzuckerung, also der Anteil an vergärbaren und unvergärbaren Zuckern wird mit dem Einhalten weiterer Temperaturstufen, über einen gewissen Zeitraum, gesteuert.

Das Infusionsverfahren wird eher für hellere, schlankere insbesondere obergärige Biere benutzt, wie z.B. beim traditionellen Bier aus Köln, dem Kölsch. Das Infusionsverfahren ist ein bisschen so wie das Anrühren von Puddingpulver mit der gesamten Menge an kalter Milch; es kann leicht zu unerwünschter Klumpenbildung führen. Erst mit neuerer Vermischungstechnik für Malz und Wasser vor dem Eintreten in den großen Maischbottich, unter Vermeidung von malzschädigenden Scherkräften, wurde das Infusionsverfahren möglich. Vom Aufheizen her ist es ein einfaches Verfahren, von der Vermischung des Malzes mit dem Maischwasser ist es technisch anspruchsvoll.

Eine Beheizung der Maische kann auch durch Dampfinjektion erfolgen, die sogenannte Mischkondensation (Kunze (2016)), was allerdings die Erzeugung eines besonders reinen Dampfes voraussetzt, da dieser letztlich ein Teil der Maische wird. Der in die Maische injizierte Dampf wird dabei in einem Reindampferzeuger seinerseits durch Dampf erzeugt und ggf. wird noch eine Wasserbehandlungsanlage oder Umkehrosmose vorgeschaltet. Diese Methode der direkten Beheizung mittels Reindampf hat die Vorteile kurzer Aufheizzeiten, den Wegfall des Heizmantels oder der Heizrohre am Maischbottich.

Beim Dekoktionsverfahren hat man gewöhnlich einen unbeheizten großen Maischbottich oder in moderneren Sudhäusern auch eine beheizte Maischbottichpfanne sowie eine kleinere beheizte Maischpfanne. Hierbei wird in mehreren Schritten ein Teil der Maische in der kleineren Maischpfanne aufgekocht und danach wieder der Hauptmaische im größeren Maischbottich zugeführt. Insgesamt steigt die Temperatur im Maischbottich schrittweise an. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt, bis die Abmaischtemperatur erreicht ist. Alternativ kann die Maische auch mit einem kleineren Teil des Frischwassers aufgesetzt werden und durch „zubrühen“ heißen Wassers die jeweiligen Temperaturniveaus der einzelnen Raststufen erreicht werden (Sünner).

Neben den beiden hier im Prinzip dargestellten Maischverfahren werden bei Kunze (Kunze (2016)) noch etwa zehn weitere Einmaischverfahren vorgestellt.

Vorgang	Temp [°C]	Rast [min]
Einmaischen	35 - 37	
Maische erhitzen bis zur 1. Raststufe		
Eiweißrast (Proteinase)	50 - 52	20 - 30
Eiweißabbau im Malzkorn		
Maische weiter erhitzen bis zur 2. Raststufe		
Maltoserast	60 - 65	45 - 60
Verzuckerung durch β -Amylase		
Maische weiter erhitzen bis zur 3. Raststufe		
Verzuckerungsrast	70 - 72	ca. 60
Verzuckerung durch α -Amylase und Glucoamylase		(über jodnormal hinaus)
Maische weiter erhitzen bis zur Abmaischtemperatur		
Abmaischen	75 - 77	

(Entscheidend sind die Rasten)

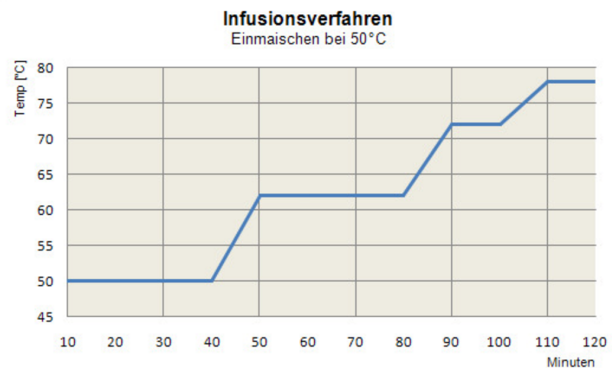


Bild 2.2: Zwei (verschiedene) Abläufe des Maischens beim Infusionsverfahren (Krause (2017))

2.3. „Abläutern“ – von der Maische zur feststofffreien Pfannevoll-Würze

Aus der Maischpfanne wird die Maische, oder auch bereits Würze genannt, zum „Abläutern“ in den Läuterbottich gepumpt. Die Funktion ist die eines großen Filters, durch den die unlöslichen Kornrückstände, Treber genannt, abgetrennt werden. Dieser Treber setzt sich auf dem Boden ab und bildet so einen natürlichen Filter, durch den die feststofffreie und malzzuckerhaltige „geläuterte Würze“ fließt. Beim Einmaischen der sogenannten Vorderwürze hat man die die Konzentration des Malzschrotes im Wasser ca. 5% höher gewählt als die sogenannte Stammwürze des Bieres werden soll. Dadurch kann man beim Läutern noch genügend Frischwasser zusätzlich durch den abgelagerten Treber-„Kuchen“ schicken, um die hier noch verbleibende Süße auszuspülen, während sich die Würze dadurch verdünnt; beim 11%-igen Bier wird also die Maische mit 16% Gewichtsprozenten angesetzt. Als Faustformel gilt:

„100 kg Malzschrot vermischt mit 300 l Wasser ergibt eine 20%-ige Würze“ (Kunze (2016)) nicht ohne Weiteres nachvollziehbar.

Für eine 16%-ige Vorderwürze, basierend auf 10.000 l (100 hl) Wasser, muss 2.666 kg Malzschrot ($100 \cdot 33,3 \cdot 16 / 20$) eingerührt werden. Mit dem Volumen des eingemaischten Schrotes von 0,7 (bis 0,8) l/kg Schüttung (Q: Kunze), entstehen dann $10.000 \text{ l} + 2.666 \text{ kg} \cdot 0,7 \text{ l/kg} = 11.866 \text{ l}$ Maische.

Um durch Zugeben von Wasser letztlich eine 11%-ige Maische zu erhalten, muss der Wasseranteil von 10.000 l auf 14.545 l angehoben werden. Die Nachgüsse im Läuterbottich werden jedoch gewöhnlich über diesen zusätzlichen Wasseranteil hinaus betrieben (Fachausdruck dafür: Anschwänzen), um mit mehr heißem Wasser, dem Treber noch mehr Extrakt zu entlocken. In der nachfolgenden Würzepfanne muss dann entsprechend wieder mehr Wasser verdampft werden, um die gewünschte Extraktkonzentration zu bekommen. Ein typisches Beispiel eines sogenannten Läuterdiagramms, welches die Extraktkonzentration über dem Läutervolumen in Hektolitern für den Bereich der direkt aus dem Maischbottich fließenden Vorderwürze (konstante Extraktkonzentration, z.B. 19%) und nachfolgend für die Nachgüsse darstellt, wird in **Bild 2.4** gezeigt. Dabei nimmt mit jedem Nachguss die Extraktkonzentration im Nachguss deutlich ab, bis hin zu ökonomisch

grenzwertigen 1%, während gleichzeitig die Gesamtwürze, bestehend aus Vorderwürze und Nachgüssen langsamer abnimmt, bis zum gewünschten Wert von z.B. 10,5% (s. Beispiel nach Bild 2.4).

Durch die Nachgüsse wird zusätzliches Extrakt aus den Treberablagerungen ausgeschwämmt, wodurch mehr Frischwasser zur ursprünglichen Würze dazugegeben wird, um auf die gewünschte Würzekonzentration in der Maischpfanne zu kommen, als wenn man die das Wasser ohne die Treber auszuwaschen hinzugeben würde. So zeigt das Beispiel in Bild 2.4, dass das Würzevolumen von ca. 66 hl Vorderwürze durch die Nachgüsse auf 152 hl in der Würzepfanne ansteigt. Dieses entspricht in etwa auch dem bei Kunze (Kunze (2016)) aufgeführten Mengenverhältnis Vorderwürze zu Nachgüsse (Anschwänzwasser) von 1: 1,30 - für eine Vorderwürzekonzentration von 19% und einem Bier am Ende des Brauprozesses von 12%; in der Pfanne müsste demnach durch Verdampfung die Konzentration von 10% wieder auf 12% gesteigert werden.

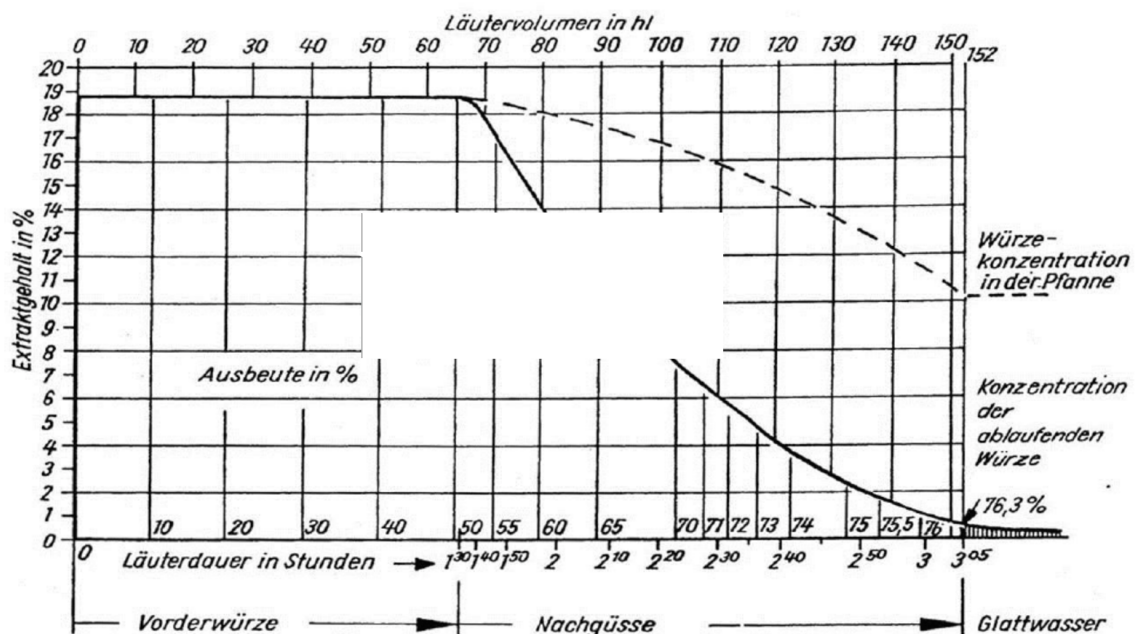


Bild 2.4: Beispiel für den Extraktverlauf beim Läutern (Läuterdiagramm) (Krause (2017))

Der Maischeprozess richtet sich also nicht unbedingt vorrangig nach dem energieeffizientesten Vorgehen, sondern in erster Linie wird auf die langjährige Prozessentwicklung zur Herstellung der richtigen Würze für dieses Bier und seinen besonderen Geschmack Rücksicht genommen.

2.4.a. Nebenprozess - Herstellung von Hopfenpellets

Rohhopfen mit einem Wassergehalt von 75 bis 80% muss zur Lagerung zunächst auf einen Wassergehalt von 8 bis 12% getrocknet werden. Dies geschieht als Standardprozess mit einem Bandtrockner bei Temperaturen bis maximal 50°C.

Wird der Hopfen zu Pellets, dem sogenannten „Typ 90“, verarbeitet, werden von Kunze (Kunze (2016)) Trocknungsschritte mit Luft von zunächst 20 bis 25°C und später von 40 bis 50°C angegeben. Zielwassergehalt liegt hier bei 7 bis 9%. Zur werthaltenden Lagerung der Pellets müssen diese allerdings wieder auf 3°C gekühlt werden.

Aus aromatischen Gründen wird der Lupulinanteil des Hopfens erhöht, durch Separation der kleinen (0,15 mm) Lupulindrüsen aus dem Doldenverband, und es werden sogenannte Lupulinangereicherte Pellets („Typ 45“) hergestellt, indem nach der Trocknung der Rohhopfen vor dem Mahlen bei -30 bis -40°C tiefgefroren wird.

Bei der Herstellung von Isomerisierten Pellets werden diese wiederum mehrere Tage bei 50°C warm gelagert.

Zu modernen Verfahren gehört die Herstellung von Hopfenextrakten mit Ethanol, flüssigem CO₂ oder auch überkritischem CO₂ als Extraktionsmittel, unter den jeweils erforderlichen thermischen Bedingungen für das jeweilige Extraktionsverfahren.

2.4.b „Kochen“ der Würze unter Zugabe von Hopfen in der Würze- oder Sudpfanne

Aus dem Läuterbottich gelangt die geläuterte Würze unter Zugabe von Hopfen zum „Kochen“ in die Würze- bzw. Sudpfanne. Der Hopfen ist „die Seele des Bieres“ laut Brauerei Gaffel. Neben der Auswahl und Güte der Hopfenqualität beeinflussen auch die Menge und der Zeitpunkt der Hopfenbeigabe den Geschmack des Bieres. Der Hopfen gibt dem Bier sein würziges Aroma, trägt zur Haltbarkeit bei und hat Einfluss auf die Schaumstabilität des gezapften Bieres im Glas.

Durch das Kochen der Würze bei Temperaturen bis ca. 98°C und die Verdampfung von Wasser wird der Sud keimfrei und die Enzyme werden inaktiviert. Nach etwa 70 Minuten erhält der Sud durch Verdampfung eines Teils des Wassers den gewünschten Stammwürzegehalt, welches im allgemeinen die Summe aller vor der Gärung in der Würze gelösten Inhaltsstoffe aus Malz und Hopfen sind, insbesondere beabsichtigte Anteile an Malzzucker und Eiweißstoffen. Diese zeitliche Angabe bezieht sich auf eine bestimmte Bierherstellungsart, in diesem Fall auf das Würzekochen zur Herstellung von obergärigem Kölsch in der Brauerei Gaffel zu Köln.

Früher lag die Verdampfungsrate des Wassers mit 10-15% recht hoch, ausgehend vom Ausgangsextraktgehalt der sogenannten „Pfannevoll“-Würze beim Befüllen der Würzepfanne, auf die Konzentration des Endprodukts des Würzekochens, der Ausschlagwürze. Heutzutage wird eine Verdampfungsrate von maximal 4% angestrebt. Man startet, wie in Bild 2.4 dargestellt mit einem hohen Extraktgehalt von 18-19% in der Vorderwürze, um genügend Anschwänzwasser beim Abläutern hinzugeben zu können und bei der Pfannevoll-Würze immer noch bei gut 10% zu liegen. Durch die Verdampfung im Würzekocher wird der Extraktgehalt der Ausschlagwürze auf ca. 12% angehoben und kann dann in anschließenden Prozessschritten noch leicht auf die Stammwürze des fertigen Bieres von 11,5% abgesenkt werden. Ein Erhöhen der Stammwürze ist nach dem Kochen nicht mehr vorgesehen.

Laut Kunze (Kunze (2016)) hat sich im Brauereiwesen die Einstellung durchgesetzt nicht länger als notwendig zu kochen, nicht so viel Wasser zu verdampfen und aufgewendete Energie, den vorhandenen Anlagen entsprechend, möglichst vollständig zurückzugewinnen.

2.5. „Klären“ der Ausschlagwürze im Whirlpool

Der Prozessschritt des „Klärens“ im sogenannten Whirlpool ist in Bild 2.1 nicht dargestellt. In einer alternativen Darstellung des Brauprozesses in Bild 2.6 ist dieser nicht unwichtige Schritt berücksichtigt. Beim Klären der heißen Ausschlagwürze werden überschüssige Eiweißteilchen und Hopfenrückstände, auch als Heißtrub bezeichnet, mittels Rotation ausgeschieden. Energetisch interessant ist die Maßnahme zur Verhinderung der Anreicherung eines geschmacklich unerwünschten Aromastoffes, des DMS, in der Würze. Oftmals wird entweder vor dem Whirlpool eine Abkühlung der Würze in einem Vorkühler, meist Plattenwärmeübertrager, auf wenigstens 85°C vorgenommen, oder alternativ kann nach dem Whirlpool ein Dünnschichtverdampfer oder Innenkocher eingesetzt werden, über den, die leichter flüchtigen Aromastoffe abgezogen, gestrippt werden.

2.6. „Kühlen“ im Würzekühler

Im sich jetzt anschließenden Würzekühler wird die geklärte Würze auf die sogenannte Anstelltemperatur abgekühlt. Die typische Anstelltemperatur beträgt bei obergäriger Hefe im anschließenden Gärprozess 15 bis 18°C. Untergärige Hefe vollzieht den Gärprozess bei der deutlich geringeren Temperatur von 4 bis 8°C (Kunze (2016)). Zügiges Kühlen ist zur Verhinderung der Bildung von Mikroorganismen erwünscht. Die schnelle Kühlung ist vor allem in der letzten Phase unterhalb von 40°C wichtig, weil sich in diesem Bereich Bierschädlinge schnell entwickeln können (Krause (2017)).

2.7. „Gären“ mit Hefe im offenen Gärtank

Beim nächsten Schritt des anschließenden Brauvorgangs, nach dem Kühlen, werden die Inhaltsstoffe aus dem Prozessschritt Würzekochen mit Hilfe von Hefebakterien etwa jeweils zu einem Drittel in Alkohol und Kohlensäure vergoren, das letzte Drittel bleibt als nicht vergärbare Restextrakt übrig (Kunze (2016)).

Die auf die jeweilige Anstelltemperatur abgekühlte Würze gelang in den eigentlichen Hauptprozess der Bierherstellung, das „Gären“, der klassisch in offenen Gärtanks aus Edelstahl unter Zugabe der Bierhefe stattfindet. Beim Gärprozess werden nun die in der Würze enthaltenen Malzzucker durch den metabolischen Prozess der Hefe zu Alkohol und Kohlensäure umgewandelt. Die Hefezellen brauchen für ihre Vermehrung bereits vor Beginn des Gärprozesses viel Sauerstoff. Die Würze wird daher bereits auf dem Transportweg vom Würzekühler sowie in den Gärtanks über Düsen belüftet. Für das Kölsch Bier in der Gaffel Brauerei, Köln (Q: Gaffel) dauert dieser Gärprozess des obergärigen Bieres 2 bis 3 Tage. Am Ende des Gärprozesses sammelt sich die Hefe durch Aufnahme von Sauerstoff auf der Oberfläche der gärenden Würze (daher die Bezeichnung „obergärig“).

Die klassische Trennung des Gärprozesses und der anschließenden Lagerung in einer offenen Gärwanne und einem geschlossenen Lagerbehälter erfolgt in modern ausgerüsteten Brauereien in einem zylindrokonischen Tank (s. Bild 2.5).

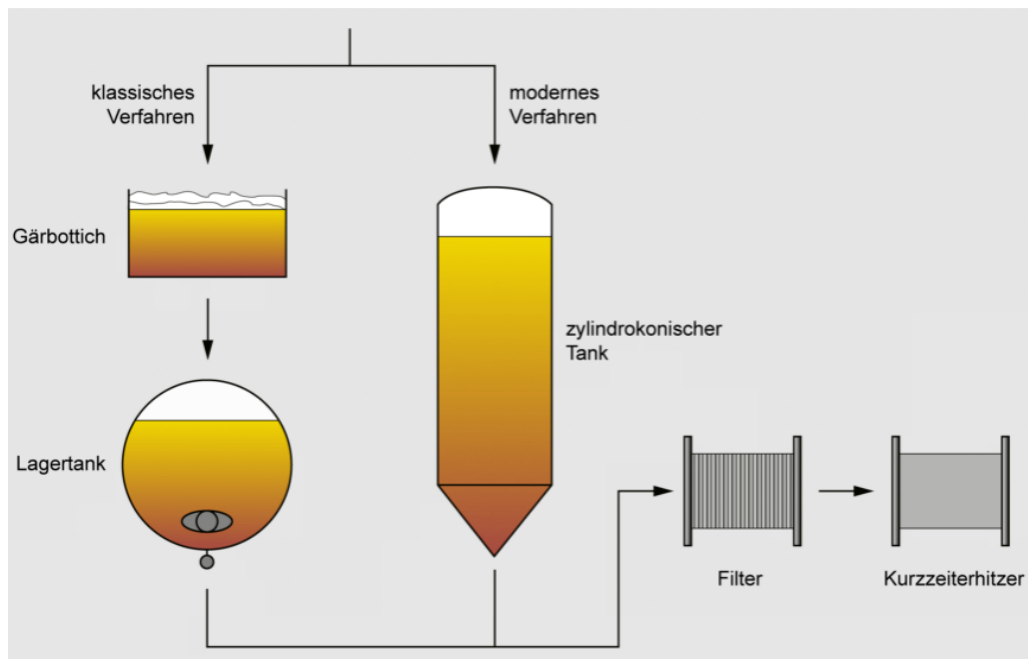


Bild 2.5: Gären, Reifen und Filtrieren; klassisch und modern (Thieme RÖMPP (2016))

Wie unser Bier entsteht

Der Brauprozess vom Sudhaus bis zur Abfüllung

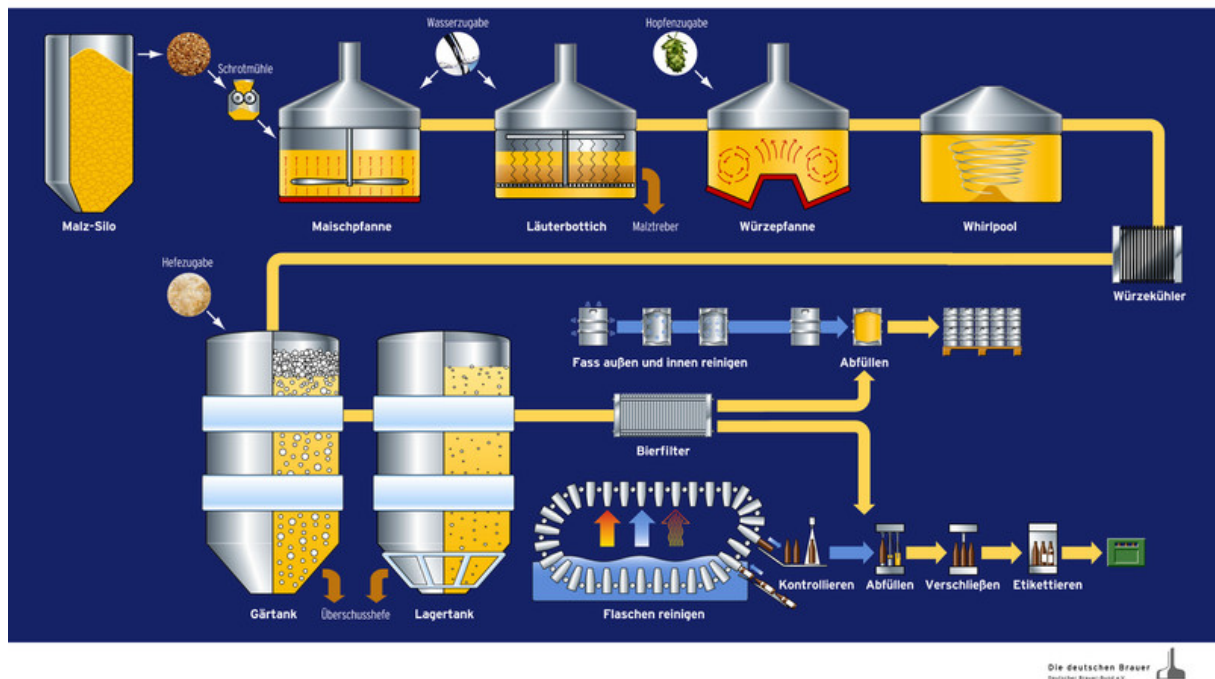


Bild 2.6: Alternative (zu Bild 2.1) schematische Darstellung des Brauvorgangs in einer Brauerei (Deutscher-Brauer-Bund (2017))

2.8. „Reifen“ des Jungbiers im geschlossenen Lagertank

Der Gärprozess wird abgebrochen, sobald der gewünschte Grad der Umsetzung der Malzzucker durch die Bierhefe erreicht ist. Das Jungbier wird dann zur Reifung für 2 bis 3 Wochen in geschlossene Lagertanks aus Edelstahl gepumpt. Die Lagertemperatur beträgt 0 bis 1°C.

2.9. „Filtrieren“ und „Abfüllen“

Nach dem Reifen im Lagertank ist das Bier zum Trinken geeignet, enthält jedoch noch Schwebestoffe. Um kristallklar zu werden, wird das Bier noch gefiltert, bevor es zur Abfüllung in gereinigte Flaschen oder Fässer gelangt.

Der Flaschenreinigungsprozess kann bei jeder Brauerei sehr unterschiedlich aussehen. Für Mehrwegglasflaschen sei hier aus energetischer Sicht, beispielhaft der Prozess der Einend-Reinigungsmaschine „Lavatec KES 34“ der Firma Krones vereinfacht dargestellt.

In den Tauchbädern der Vorweiche werden die Verschmutzungen zunächst angelöst, gefolgt von anschließendem Ausspritzen mit warmem Wasser (ca. 40 bis 50°C). Daran schließen sich Vorlaugebäder mit Erwärmung auf 60°C an. In einem Hauptlaugebad durchläuft die Flasche über 6 bis 10 min bei 80°C mehrere Schleifen; alle Verunreinigungen sowie Etiketten und Leim müssen sich bis jetzt vollständig lösen. Über einen Durchlauferhitzer wird die umgepumpte Lauge auf der Betriebstemperatur gehalten. Die aufzuwendende Wärmemenge entspricht in etwa dem Wärmebedarf zum Aufwärmen der Flaschen von Umgebungstemperatur auf die Laugentemperatur, zuzüglich Verluste. Ein Nachlaugebad wird mit einer Temperatur von ca. 50°C betrieben. Dabei werden der Ablauf nach dem Ausspritzen der Flaschen und die Überschusswärme dem Vorlaugebad zugeführt, womit eine gewisse Rückgewinnung der Wärme realisiert wird. Mit Wasser abnehmender Temperatur, bis hin zu Frischwasser bei 10 bis 12°C werden die Flaschen schrittweise ausgespritzt und heruntergekühlt.

Die Kaltabfüllung des Bieres bei 5 bis 10°C ist die übliche Art der Abfüllung des Bier (Kunze (2016)).

2.10. Wärme- und Kältebedarfe „Qualitativ“ mit Temperaturbereich

Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die Prozesskette der Bierherstellung bei der das Brauwasser entlang seines Weges mit den Zutaten Malz (beim Maischen), Hopfen (beim Kochen) und Hefe (beim Gären) verschiedene Stadien durchläuft, die dem Vorgang zur Zubereitung eines Puddings in der Küche ähneln. Vorbereitende Teilprozesse sind das Mälzen der Gerste (Teilprozess 1) und das Trocknen des Hopfens (Teilprozess 4a); angegeben sind jeweils die Temperaturen der Luft, mit welcher das Malz gedarrt und der Hopfen getrocknet wird. Die Prozessschritte Maischen (2), Abläutern (3) und Kochen (4b) sind die ersten Hauptprozesse im Sudhaus und laufen hintereinander ab, jeweils unter Wärmezufuhr. Angegeben sind die im jeweiligen Teilprozess maximal erreichten Temperaturen. Auf die bereitzustellenden Wärmemengen wird in Kapitel 5 detailliert eingegangen. Der Teilprozess „Kochen“ der Würze in der Pfanne erreicht jedoch die Siedetemperatur der Maische und ist mit einer Teilverdampfung verbunden, die aufgrund des Phasenwechsels besonders energieintensiv ist.

Die nachfolgenden Teilprozesse 5 bis 8 laufen bei niedrigen Temperaturen im Kühlkeller ab. Einen besonders großen Temperatursprung erfährt die Würze nach der Beendigung des Kochens sowie der Feststoffabtrennung im Whirlpool (an dieser Stelle bereits eine gewisse Abkühlung), wonach eine sehr rasche Abkühlung im Würzekühler von > 85°C auf ca. 8 oder 15°C stattfindet, je nach Hefetyp als Zugabe bei der anschließenden Gärung. Die nächsten Schritte sind mit weiterer Kühlung verbunden, bis das gereifte Bier für die Abfüllung in Flaschen und Verkaufsfässer bereit ist und kurz pasteurisiert, also kurz erhitzt und wieder abgekühlt wird. Obwohl die Teilprozesse Gären und Reifen bei ähnlichen Temperaturen stattfinden, so erfordert die lange Zeitdauer von 2-3 Tagen für das Gären sowie mehrere Wochen für das Reifen eine kontinuierliche Kühlung. Besonders die Kälteverluste an die Umgebung spielen wegen der langen Zeitdauer dieser Teilprozesse eine besondere Bedeutung.

Auf die im Brauprozess eingesetzten Energien wird vertiefend im Kapitel 5 eingegangen.

Prozess	1	2	3	4a	4b	5	6	7	8	9
Bedarf	Mälzen	Maischen	Abläutern	Hopfen	Kochen	Klären	Kühlen	Gären	Reifen	Abfüllen
Wärme	X	X	X	X	X					X
Temp.	85°C	78°C	78°C	50°C	103°C					80°C
Kälte						X	X	X	X	
Temp.						83°C	10°C	8°C	0°C	

Tabelle 2.1: Übersicht der Wärme- und Kältebedarfe entlang der Prozesskette in „qualitativer“ Weise; jeweils zu erreichende obere und untere Temperaturniveaus im Kühlgut.

3 Kühlung und Kälte

3.1. Was ist Kälte

In der Thermodynamik, der Lehre über die Wärme als Energieform und der Energieumwandlungsprozesse, bezeichnet man mit Kälte die Wärme, welche unterhalb der Umgebungstemperatur eines thermodynamischen Systems innerhalb dieses Systems oder Kontrollraum vorliegt. Damit unterscheidet sich Kälte von der Wärme nur durch das Temperaturniveau, welches Kälte und Wärme charakterisiert. Bei einer Standardumgebungstemperatur von 20°C , erstreckt sich der Bereich der Kälte, als Zustand eines Systems, welches sich in dieser Umgebung befindet, von einer Temperatur gerade $< 20^{\circ}\text{C}$ bis zum absoluten Nullpunkt der Temperatur bei $-273,15^{\circ}\text{C}$. In der Thermodynamik wird die Kelvin-Temperaturskala verwendet, welche dieselbe Teilung besitzt wie die im Alltag gebräuchliche Celsius-Skala, jedoch liegen die Werte um jeweils $273,15$ Einheiten höher; der absolute Nullpunkt der Temperatur liegt demnach bei 0 Kelvin und die Umgebungstemperatur von 20°C entspricht $293,15$ K.

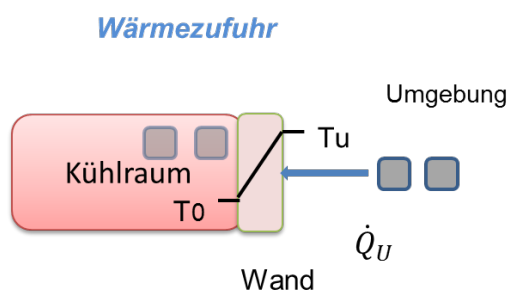


Bild 3.1: Schema des Transports von Wärmeenergie aus der Umgebung in einen Kühlraum

Wenn man einen Kühlraum betrachtet, ist dieser thermisch über die Kühlraumwand mit der Umgebung verbunden bzw. gekoppelt. Um die Temperatur des Kühlraums auf einem konstanten Wert T_0 unterhalb der Umgebungstemperatur T_u zu halten, obwohl Wärme aus der Umgebung durch die Wand in den Kühlraum dringt (oder warme Materie in den Kühlraum verbracht wird), muss ein gleich großer Betrag an Wärme \dot{Q}_U kontinuierlich aus dem Kühlraum wieder heraustransportiert werden. Diese Erkenntnis entspricht in der Thermodynamik einem Satz, der als der 1. Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet wird und der allgemein als Energieerhaltungssatz bekannt ist; Wenn ein System, wie der Kühlraum seinen Zustand (hier vertreten durch die Zustandsgröße Temperatur) bewahren will, muss die Summe aller Energieströme, die in den Kühlraum hinein gelangen gleich der Summe aller Energieströme sein, die aus dem Kühlraum herausführen. Das bedeutet anders gesagt, dass die Nettoenergiezufuhr an den Kühlraum gleich Null sein muss, damit sich die Temperatur im Kühlraum nicht ändert.

Nun gibt es in der Thermodynamik die grundlegende Erkenntnis, die uns auch aus der Beobachtung der Realität bekannt ist, dass Wärme selbstständig immer nur von einem System höherer Temperatur zu einem System niedrigerer Temperatur übertragen wird; Wenn die Kühlanlage für den Kühlraum abgeschaltet wird, nähert sich der Kühlraum mit der Zeit der Temperatur der Umgebung an. Wärme ist also aus der Umgebung mit der höheren Temperatur T_u in den Kühlraum mit der

niedrigeren Temperatur T_0 gelangt. Nie wird man beobachten, dass die Temperatur des Kühlraums weiter absinkt, also Wärme aus dem Kühlraum bei $T_0 < T_u$ an die Umgebung abgegeben wird.

Das hat zur Folge, dass man die Wärme, welche sich bei tieferer Temperatur $T_0 < T_u$ im Kühlraum ansammelt, nicht ohne Weiteres wieder aus dem Kühlraum heraus transportieren kann, zumindest nicht ohne den Einsatz von zusätzlicher Energie. Der gewünschte Vorgang geschieht folglich nicht selbstständig.

Die Thermodynamik liefert ein Modell, um diesen notwendigen Energieaufwand bei der Aufrechterhaltung der Kühlung, also dem Transport von Wärme entgegen des Temperaturgefälles, quantifizieren zu können.

Schauen wir direkt auf das Ergebnis einer thermodynamischen Herleitung, die sich aus dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik ergibt; Jede Wärmemenge enthält einen Anteil, der sich in einem idealen technischen Prozess (also theoretisch) vollständig in jede andere Energieform umwandeln lässt, folglich auch in technische Arbeit. Dieser Anteil der Gesamtenergie einer Menge an Wärme nennt man die Exergie der Wärme. Der restliche Anteil der Gesamtenergie der Wärmemenge lässt sich nicht in technische Arbeit umwandeln und wird mit Anergie der Wärme bezeichnet. Die technische Arbeit selber besteht entsprechend nur aus reiner Exergie. Diese Modellvorstellung entspricht dem gleichwertigen Modell von der Zustandsgröße Entropie, die mit jedem Wärmestrom, quasi als „Begleitzustandsgröße“, transportiert wird, nicht jedoch mit den Energieformen der technischen Arbeit und des elektrischen Stroms. An dieser Stelle wird jedoch nicht weiter darauf eingegangen.

Es wurde bereits erwähnt, dass zum Transport von Wärme ein Temperaturgefälle zwischen dem wärmeabgebenden System und dem wärmeaufnehmenden System bestehen muss. In der Praxis kennen wir das z.B. bei der Abkühlung einer Getränkeflasche im Kühlschrank; soll dies möglichst schnell geschehen, legen wir die Flasche lieber ins kältere Gefrierfach als in den wärmeren Kühlschrank. Der höhere Temperaturunterschied im Gefrierschrank führt zu einem schnelleren Transport der Wärme aus der warmen Flasche in den gekühlten Raum. Die Temperaturdifferenz zwischen dem wärmeren Medium und dem kälteren Medium wird als treibendes Temperaturgefälle bezeichnet. In Apparaten zur Übertragung von Wärme zwischen zwei Medien, auch Wärmeübertrager genannt, ist die übertragene Wärme bei ansonsten konstanten apparatebaulichen und strömungsbedingten Verhältnissen (letzteres bei Medien in fluiden Phase) proportional zu dieser Temperaturdifferenz. Damit diese Wärmeübertrager eine endlich große Wärmeübertragerfläche bzw. eine der Aufgabe entsprechende, ökonomisch sinnvolle Größe behalten, sind minimale mittlere Temperaturdifferenzen zwischen den beiden wärmeübertragenden Medien von üblicherweise 5 K erwünscht.

Bei der Wärmeübertragung, wie sie bei einem Kühlraum auftritt, wird die Wärme bei einer höheren Temperatur T_u aus der Umgebung in die Kühlraumwand geschickt und kommt mit tieferer Temperatur im Kühlraum an. Dem Energieerhaltungssatz entsprechend ist die Gesamtenergie, die in die Wand hineingeht gleich groß der Energie, die mit der Wärme aus der Wand in den Kühlraum tritt. Der Anteil der Exergie der Wärme hat sich jedoch verringert; es kommt bei dem Transport von Wärme entlang eines Temperaturgradienten zu einem sogenannten Exergieverlust E_v . Exergie wird in Anergie umgewandelt. Die Exergie einer Wärmemenge wird durch ihre Verlagerung auf ein tieferes Temperaturniveau reduziert. Die Größe des Exergieverlusts ist abhängig von der Temperaturdifferenz, hier der Temperatur der Umgebung T_u und der Temperatur des Kühlraums T_0 .

Man verwendet bei zeitlich konstanten Wärme- oder Energiemengen, die je Zeiteinheit über die Systemgrenze bzw. die „Kontrollraumgrenze“ übertragen werden meist die Größe eines stationären Wärmeströms \dot{Q} (Wärmemenge Q gekennzeichnet mit einem Punkt) oder entsprechend auch Exergieströme, wie in den Abbildungen 3.1 und 3.2 dargestellt sowie in den folgenden Formelbeziehungen.

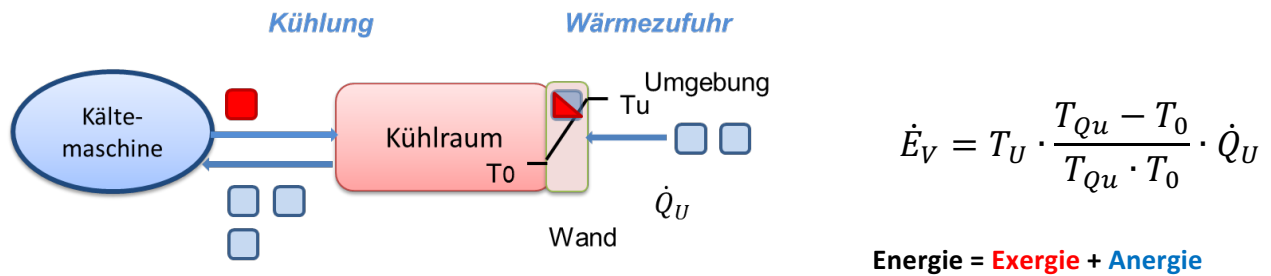


Bild 3.2: Schema der **Exergie**- und **Anergie**-Ströme beim Kühlvorgang

Wärme hat nur dann einen Exergieanteil größer Null, wenn die Temperatur der Wärme oberhalb der Umgebungstemperatur liegt. Die Definitionsgleichung für den Exergiestrom der Wärme lautet:

$$\dot{E}_Q = \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_U}{T}\right)$$

Entsprechend ergibt sich die Gleichung für den Anergiestrom zu

$$\dot{B}_Q = \dot{Q} \cdot \left(\frac{T_U}{T}\right)$$

In dem betrachteten Fall wird also nur reine Anergie als Wärme aus der Umgebung in die Wand des Kühlraumes transportiert, trotzdem muss es zu einer Umwandlung von Exergie in Anergie nach der Gleichung

$$\dot{E}_V = \dot{Q}_U \cdot \frac{T_U - T_0}{T_0}$$

in der Wand kommen, damit die Wärme in den kälteren Kühlraum transportiert werden kann. Diese Exergie für die Umwandlung in Anergie bereitzustellen ist nun die Aufgabe der Kälteanlage, die jedoch gleichzeitig die Anergie der zugeführten Wärme aus der Umgebung und die aus der Umwandlung entstandene Anergie aufnehmen muss. Man sieht also, dass dieser Kühlprozess nicht ohne den Beitrag der Kälteanlage aufrechterhalten werden kann. Die Energie zum Antrieb der Kältemaschine ist der Einfachheit halber in Bild 3.2 nicht dargestellt.

Dieser abstrakte Prozess des Austauschs von Exergie und Anergie wird in der technischen Anlage dadurch realisiert, dass die Kältemaschine über einen Wärmeübertrager (den Verdampfer) Wärme

aus dem Kühlraum aufnimmt. Das Kältemittel auf der Kältemaschinenseite des Verdampfers hat entsprechend eine noch niedrigere Temperatur als der Kühlraum.

Der Kühlprozess wurde hier für Temperaturniveaus zwischen der Umgebungstemperatur T_u und der Kühlraumtemperatur $T_o < T_u$ dargestellt; er ist aber auch für jedes andere Temperaturniveau realisierbar, bei der ein Temperaturniveau niedrigerer Temperatur gegenüber einer Umgebung mit höherer Temperatur behauptet werden soll, oder in einem instationären Prozess ein tieferes Temperaturniveau durch Aufnahme von Wärme von einem zu kühlenden Gut erreicht werden soll.

3.2. Wofür wird Kälte benötigt (Kältebedarfe)

Die Erzeugung von Kälte bzw. die Kühlung wird durch den Menschen im Wesentlichen aus den folgenden Gründen realisiert:

- a. Kühlung einer geschlossenen Umgebung in der sich der Mensch (oder Tier) aufhält, insbesondere also die Kühlung von Aufenthaltsräumen (Raumkühlung). Beispiele dafür sind Wohnräume, öffentliche Gebäude, Hotels, Büroräume sowie vom Menschen betretene Fabrikationshallen, Kabinen für den Transport von Menschen (Auto, Flugzeug, Bahn, Schiff).
- b. Kühlung von technischen und chemischen (sowie nuklearen) Prozessen in der Industrie bzw. bei technischen Anlagen, bei denen zur Erhaltung eines stationären Zustands Wärme aus der Verbrennung von Kraftstoffen, aus chemischen Reaktionen oder durch Dissipation von technischer Arbeit, von bestimmten Bauteilen, Behältnissen und Arbeitsmitteln abgeführt werden muss. Beispiele hierfür sind die Kühlung von wärmebelasteten Komponenten von Wärmekraftmaschinen (Zylinderwände bei Kolbenmaschinen, wie dem Verbrennungsmotor, oder Turbinen- und Verdichterschaufeln Gasturbinen), Reaktionsbehälter bei chemischen Prozessen, Kühlung von Kompressoren, Pumpen und Arbeitsmaschinen mit teilweiser Umwandlung der mechanischen Antriebsenergie in Wärme, sowie Kühlung von Produkten, denen zuvor im Produktionsprozess erwärmt wurden (Stahlteile im Umformprozess, Aluminium- und Eisenteile im Gussprozess).
- c. Kühlung von Lebensmitteln und pharmazeutischen Produkten im Herstellungsprozess sowie zur anschließenden Lagerung. Diesen Kältebedarf kann man auch unter den technischen oder chemischen Prozessen einordnen, jedoch wird diesen Produkten im Verlauf des Produktionsprozesses meist mehrfach Wärme zugeführt und wieder entzogen und das Endprodukt, im Gegensatz zu „unverderblichen“ Industrieprodukten, meist in eine längerfristige Kühlung oder zur Einfrierung gegeben. Beispiele hier sind sehr vielfältig; das Einfrieren von Fleisch und Fisch nach der Schlachtung oder dem Fang und Ausnehmen, das Kühlen von zuvor durch Wärmezufuhr fließfähig gemachten Lebensmittelvorprodukten und das Kühlen von zuvor im Produktionsprozess zum Ablauf chemischer oder biologischer Prozesse erwärmten Getränken, wie z.B. bei der Bierherstellung in einer Brauerei.

Es gibt sicher noch viele weitere Anwendungen von Kältetechnik, beispielsweise auch bei sehr tiefen Temperaturen in der Kryotechnik (Erzeugung und Anwendung von verflüssigten Gasen bei Temperaturen unter 120 K bzw. -150°C). Doch generell geht es immer um die Absenkung der

Temperatur physikalischer Stoffe, die zuvor beabsichtigt oder unbeabsichtigt Wärme aufgenommen haben, oder in einen stationären Zustand niedriger Temperatur versetzt werden sollen.

3.3. Kältebedarfsprofile

Für den Begriff des Kältebedarfs werden in der Literatur auch verschiedene andere Begriffe verwendet: Kühllast, Kältelast und auch Wärmelast (Drees (1992)).

Der Kältebedarf eines Kaltlagerraumes setzt sich aus verschiedenen Lastanteilen zusammen und stellt die „Wärmemenge dar, die als Wirkung der verschiedenartigen (thermischen, mechanischen, physiologischen) Belastungen sowie äußeren und inneren Widerständen der Raumluft bei konstanter Temperatur zugeführt wird“ (Mann-Hofer (1977)).

Eine Analyse des Kältebedarfsprofils bei einer Kühlaufgabe ist die Voraussetzung für die Dimensionierung von Komponenten einer Kälteanlage. Die Rahmendaten der Kühlaufgabe fließen ein in die rechnerische, tabellarische, diagrammatische und nomogramatische Ermittlung des Kältebedarfs (Breidert (2009)).

Die äußeren Lastanteile setzen sich aus folgenden Komponenten zusammen (Breidert (2009)):

1. Transmissionswärme, die über die Wände des Kühlraumes durch Wärmeleitung in den Kühlraum gelangende Wärme,
2. Austausch der Raumluft – Luftwechsel, der dann erforderlich ist, wenn der Kühlraum von Personen begehbar sein soll und eine bestimmte Luftqualität garantiert werden muss, und
3. Türöffnungsverluste, die durch die Beschickung des Kühlraums im Austausch mit der Umgebung entstehen.

Die inneren Lastanteile sind unterteilt in solche, die unabhängig von der Kühlaufgabe anfallen, wie z.B. Beleuchtungswärme, Wärmeabgabe durch Personen sowie Wärmeströme durch Arbeitsmaschinen, und Lastanteile, die durch die Kühlaufgabe bedingt sind, also die eigentlich gewünschten Nutznießer der Kälteanlage. Diese sind (Breidert (2009)):

1. Der mit dem Kühlgut zugeführte Wärmestrom (Lagergutabkühlung), welcher sich über den Massenstrom und die spezifische Wärmekapazität des Kühlgutes sowie die Temperaturdifferenz zwischen Einbringtemperatur und Kühlraumtemperatur berechnet.
2. Speziell nur bei Obst und Gemüse: ein sogen. Atmungswärmestrom
3. Verdampferventilator-Motorwärmestrom und elektrische Verdampferabtauheizung

Aus den Kälteanwendungen, wie sie in Kapitel 3.2. aufgezeigt wurden, soll hier die mitunter an erster Stelle stehende Aufgabe der Lebensmittelkühlung eingegangen werden. Anfang der 1980er Jahre wurden ca. 1/4 der erzeugten, schnellverderblichen Lebensmittel kältebehandelt, wobei die jährlichen Verluste an frischem Obst und Gemüse dennoch zwischen 25 und 80% betrugen (Drees (1992)). Meine Auffassung ist, dass sich daran sicherlich schon einiges bis heute geändert hat, zum einen durch die Ausweitung der Kühlung von Lebensmittel, aber auch anderer Methoden, die Lebensmittel z.B. mittels Schutzatmosphären vor der mikrobiologischen Umwandlung zu bewahren.

Das Kältebedarfsprofil bei der Frischhaltung (Stoffkonservierung) von Lebensmitteln besteht zunächst aus einem Abkühlvorgang, gefolgt entweder von einer Kühllagerung bei Temperaturen über 0°C oder Gefrierlagerung unter 0°C, soweit die Lebensmittel dies vertragen. Für eine optimale Lagerung, über die jeweils vorgesehen Lagerdauer, verlangen Lebensmittel unterschiedliche Lagerbedingungen in Bezug auf Temperatur sowie, bei Kontakt des Lebensmittels mit der Umgebungsluft, auch in Bezug auf Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung und Lufterneuerungsrate (Drees (1992)). Für Brauereierzeugnisse kommt eine Gefrierlagerung aufgrund eines Qualitätsverlustes nicht in Frage. Andererseits wäre bereits der Energieaufwand zur Abfuhr der Schmelzenthalpie (benötigte Wärmemenge für den Übergang vom festen in den flüssigen Aggregatzustand) beim Einfrieren unverhältnismäßig hoch im Vergleich zum Marktwert des Produktes.

Nach Angaben des ILKA-Berechnungskatalogs (ILKA) liegen bei der Kühllagerung die optimalen Temperaturen für Fleisch und frischem Fisch um 0°C, bei Wurstwaren um 1 bis 5°C, Milch und Milcherzeugnissen bei 2 bis 5°C, Obst und Gemüse wieder um die 0°C (bis auf Kartoffeln bei 3 bis 10°C). Für Bier im Fass wird als optimale Lagerbedingung eine Temperaturspanne von 2 bis 4,5°C für eine Lagerdauer von ungefähr 3 bis 10 Wochen angegeben. Die Gefrierlagerung für Fleisch und Fleischerzeugnisse, Fisch, Fertiggerichte, Backwaren (Kunis (1982)) und auch Obst liegt meist bei -18°C, welche auch die Standardtemperatur von Gefrierschränken für den Endverbraucher darstellen.

Bei der Abkühlung von Lebensmitteln mit feuchter Oberfläche wird mit der Wärme auch Wasserdampf an die Umgebung abgegeben, welche dem Lebensmittel entzogen wird. Der unerwünschte Effekt des Schwundverlustes kann durch verringerte Abkühlzeit und tiefe Temperatur in einer sog. Schnellabkühlung, und bei gleichzeitig hoher relativer Luftfeuchtigkeit verringert werden. Beim flüssigen Lebensmittel Bier ist dieses Problem der „Austrocknung“, bei Prozessschritten, bei denen die Vorstufen des Bieres in einem offenen Tank stattfinden, besteht in vernachlässigbarer Weise. Zu Flüssigkeitsverlusten kommt es beim Kochen der Biervorstufe der Würze. Aufheizvorgängen der Würze; diese Verdampfung ist jedoch gewollt.

In der Verarbeitung von natürlichen Lebensmitteln gilt der Grundsatz, diese nach der Gewinnung (z.B. Ernte oder Schlachtung) möglichst unmittelbar abzukühlen. Strenge hygienische Vorschriften, zur Erreichung möglichst geringer Anfangskeimzahl, können nur helfen die Qualität des Kühlgutes annähernd zu erhalten. Dabei ist zwischen tierischen und pflanzlichen Lebensmitteln zu unterscheiden. Bei den pflanzlichen Lebensmitteln gehen die Stoffwechselvorgänge trotz Kühlung verlangsamt weiter.

Bei der Schnellabkühlung in einem Schnellabkühl tunnel werden Rindfleisch und Schweinefleisch bei Lufttemperaturen von -1 bis 0°C, bei einer relativen Luftfeuchte von 95% und 100-facher stündlicher Luftumwälzung in 12 bis 18 Stunden von 37°C auf 4°C (Kerntemperatur) abgekühlt (Tafel 11.1. bei Drees (1992)). In einem Gefriertunnel wird bei Lufttemperaturen zwischen -25 und -30°C, bei entsprechend sehr geringer, unregelmäßiger Luftfeuchtigkeit in weiteren 15 bis 20 Stunden eine Temperaturabsenkung des Schlachtgutes von 4 auf -10 °C erreicht. Im Gefriergutlagerraum erfolgt dann das Nachgefrieren auf -18°C.

Beim Prozess des Einfrierens von Schlachtgut muss zu Beginn der Kühlung eine deutlich größere Kälteleistung zur Verfügung gestellt werden, als zum Zeitpunkt der Annäherung der Fleischkerntemperatur an den Zielwert (Kunis (1983)). Das noch warme Schlachtgut darf nicht zu einem Anstieg der Lufttemperatur im Kühltunnel führen. Mit fortschreitender Kühldauer nimmt der Kältebedarf nach einer e-Funktion ab; die Kältemaschinenleistung muss nach und nach

heruntergeregelt werden, um im Verlauf, ein zu starkes Absenken der Lufttemperatur und ein Gefrieren der Fleischoberfläche zu vermeiden. Entsprechend muss zu Beginn der Abkühlung mit einer hohen Luftumwälzrate gearbeitet werden, die mit fortschreitender Abkühlung abgesenkt werden kann.

Für die Schnellabkühlung ermittelt die übliche Kältebedarfsrechnung eine durchschnittliche Kälteleistung, die als Auslegungsgröße für die Kälteanlage deutlich zu gering ist. Sie ist also mit höheren Energie- und Investitionskosten verbunden, auch wegen der tieferen Verdampfungstemperatur und den größeren Antriebsleistungen der Ventilatoren im Vergleich zu früher üblichen gestaffelten Abkühlverfahren. Diese waren jedoch in der Vergangenheit durch lange Abkühlzeiten gekennzeichnet und hatten einen deutlichen Qualitätsverlust zur Folge.

Im Vergleich zur Kühlung eines feststofflichen Lebensmittels, wie dem Schlachtgut, erfolgt die Kühlung von Flüssigkeiten, wie sie vor allem bei der Kühlung von Milch und Milcherzeugnissen oder bei der Kühlung von Bier in Brauereien angewandt wird, durch die Verfahren der Durchlaufkühlung oder der Lagerkühlung. Kontinuierlich arbeitende Durchlaufkühler können Flüssigkeiten in wenigen Sekunden auf die gewünschte Soll-Temperatur bringen, während die batch-weise arbeitende Lagerkühlung dafür mehrere Stunden benötigt (Drees (1992)).

Temperaturen des kühlenden Mediums, die an den wärmeübertragenden Wänden vorliegen, dürfen die zu kühlenden Produkte zu keinem Zeitpunkt zum Gefrieren bringen. Dies wäre nicht nur nachteilig für die Qualität des Lebensmittels; eine Schicht gefrorenen Kühlgutes führt zu einem den Wärmetransport verschlechternden Wärmedurchgangskoeffizient, was eine weitere Absenkung der Kühlmitteltemperatur zur Folge hätte. Das Eis wird an seiner Kühlgutseite den Gefrierpunkt nicht unterschreiten. Die Eisschicht kann sich jedoch, ohne die Kühlleistung deutlich zu reduzieren, nicht mehr abbauen, stattdessen aber eher weiter aufbauen, obwohl das Kühlgut weniger stark gekühlt wird als ohne die Schicht. Eine indirekte Kühlung über eine Sole verhindert die Gefahr des Anfrierens.

In der Milchwirtschaft werden meist nur Milchkühlwannen mit Solekühlung (indirekte Verdampfung) zur schonenden Abkühlung verwendet. Dabei kühlt das Kältemittel der Kälteanlage zunächst über den Verdampfer die Sole, welche eine Natriumchlorid-Lösung sein kann oder meist eine Mischung aus Ethylenglykol und Wasser, welche bei einem 50%igen Mischungsverhältnis einen noch tieferen Gefrierpunkt von -32°C besitzt (Glysofor (2017)).

Andererseits bieten Plattenkühler (Plattenwärmeübertrager), die dem Prinzip der vorteilhaften Durchlaufkühlung entsprechen, eine schnelle und gleichmäßige Abkühlung. Der flüssige Kühlgutstrom und der wärmeaufnehmende, kältere Kühlstrom (z.B. Sole) werden in strukturierten Kanälen und im Gegenstrom zueinander, entlang der beiden Seiten eines aus vielen Edelstahlplatten mit Abdichtungen zusammengesetzten Wärmeübertragers geführt. Die Temperaturverhältnisse sind an jedem Ort des Plattenapparates zeitlich konstant. Gleichzeitig ist die Länge des Strömungsweges durch den Plattenapparat sehr viel größer als die Strömungskanalbreite, so dass die Verweilzeitverteilung der Strömungsteilchen sowohl des Lebensmittels als auch der Sole meist eng genug ist ($\text{Péclet-Zahlen} > 100$), um für stationäre Wärmeübertragungsverhältnisse als Pfropfenströmung angenommen zu werden (Balzereit (1999)). Durch die geringe Dispersion der Strömung in mehrgängigen Plattenapparaten besteht weder das Problem der Vereisung noch zu lange oder zu kurze Verweilzeiten einzelner Lebensmittelteilchen im Apparat sowie die damit zusammenhängenden Qualitätsverluste. Diese Kühltechnik hat daher den Vorteil hygienisch einwandfreie Behandlung des Kühlgutes zu gewährleisten.

Aus hygienischen Gründen ist man in Molkereien und Brauereien von der Solekühlung abgekommen und verwendet stattdessen vermehrt Süßwasserkühlung. Schäden an Rohrleitungen und Apparaten bei Undichtigkeiten werden so vermieden. Andererseits nutzt man jetzt doch wieder die Eisbildung, diesmal als Kältespeicherung ohne einen großen Kältespeicher zu benötigen; diesmal jedoch durch die Bildung von Eis auf der Süßwasser-Kühlmittelseite. Als Wärmeübertrager eignen sich die Plattenapparate aufgrund ihrer flachen Strömungskanäle jedoch nicht. (Kühlwannen mit Wandkühlung durch Süßwasser, das an der Innenfläche noch flüssig ist und Wärme vom Kühlgut des in der Wanne befindlichen Lebensmittels aufnimmt und durch die Eisschicht auf der Außenseite der Wanne an das Kältemittel, im durch Kühlschlangen realisierten Verdampfer des Kältekreislaufes, abgibt.)

Eiswasserkühlung kann überall dort angewandt werden, wo auf Temperaturen von über 0°C gekühlt werden soll und ist geeignet zur Bedienung von zeitweise auftretendem hohem Kühlbedarf sowie zum Anschluss mehrerer Kälteverbraucher. Über die Eisbildung kann über einen längeren Zeitraum ein Kältevorrat mit einer Kälteanlage geringerer Nennleistung eingelagert werden, und steht dann bei hohem Kühlbedarf, den die Anlage ad hoc nicht bedienen könnte, zur Verfügung. Im Wasservorlauf herrscht zudem eine konstante Temperatur von um die 0°C und Nachkühlung kann, bei elektrischem Antrieb der Kälteanlage zu off-peak Zeiten erfolgen (Drees (1992)). Die Speicherung der Kälte erfolgt durch Anfrieren des Wassers an den Rohren oder Platten des Verdampfers. Ist der Kältebedarf gleich der Kälteleistung der Anlage, tritt ein Gleichgewichtszustand mit konstantem Eisbelag am Verdampfer ein. Übersteigt der Kältebedarf die Kälteleistung, so schmilzt der Eisbelag ab und deckt mit der Aufnahme der Schmelzwärme die Minderleistung der Kälteanlage. Arbeitet die Kälteanlage weitestgehend ohne Kältebedarf, sinkt die Verdampfertemperatur ab und bildet mehr Eis. Bei einer bestimmten Stärke der Eisschicht (ab ca. 35 mm) wird die Kältespeicherung jedoch unwirtschaftlich und die Anlage sollte abgeregelt werden.

3.4. Wie kann Kälte erzeugt werden – Thermodynamische Grundlage

In Kapitel 3.1. haben wir als Aufgabe der Kältemaschine darin identifiziert, dass sie einen Nettowärmestrom aus dem Kühlraum aufnehmen soll, um die Kühllasten des Kühlraums zu kompensieren. Dieser Nettowärmestrom setzt sich allerdings zusammen aus einem Exergiestrom, welcher dem Kühlraum zugeführt wird und einem Anergiestrom, der vom Betrag her die Summe aus den Kühllasten und dem von der Kältemaschine an den Kühlraum gelieferten Exergiestrom entspricht. In Bild 3.3 entspricht der Nettowärmestrom zwei Leistungseinheiten (quadratische Kästchen), setzt sich allerdings zusammen aus der Aufnahme von drei Leistungseinheiten Anergiestrom (hell blaue Kästchen) und der Abgabe von einer Leistungseinheit Exergiestrom (rotes Kästchen). Aufgrund der bei der Übertragung von Wärme entlang eines Temperaturgradienten in der Wand des Kühlhauses sich ändernden Temperatur des Wärmestroms, und damit einhergehend einer „Abwertung“ der Qualität von einer Wärme mit einem höheren zu einer Wärme mit einem niedrigeren Exergieanteil, entsprechend Gleichung 1 in Kapitel 3.1., kommt es zu einer Umwandlung von Exergie in Anergie. Da ein Wärmestrom aus der Umgebung aber definitionsgemäß keinen Exergieanteil besitzt, muss diese Exergie anderweitig bereitgestellt werden, damit die Kühlraumtemperatur konstant gehalten werden kann. Dies ist die Aufgabe der Kältemaschine. Entsprechendes gilt bezüglich des Wärmetransports in den Kühlraum auch bei der Zufuhr warmer Umgebungsluft über eine geöffnete Tür oder das Einbringen von wärmerem Kühlgut. Bei der

Einlagerung von höher temperiertem Kühlgut als die Kühlraumtemperatur, welches mit seinem Wärmestrom auch einen Exergieanteil in den Kühlraum mitführt, muss die Kälteanlage zunächst diesen Exergieanteil aus dem Kühlraum transportieren. Der Exergiestrom ist nach der Definitionsgleichung in Kapitel 3.1 durch das Verhältnis der thermodynamischen Temperaturen des Wärmestroms und einer Umgebungstemperatur definiert, bei der ein Wärmestrom keinen Exergieanteil besitzt. Zusätzlich muss von der Kälteanlage noch der Exergieverluststrom bei der Abkühlung des Wärmestroms von Umgebungstemperatur auf das Temperaturniveau des Kühlraums zur Verfügung gestellt werden.

Für die Kältemaschine wird eine Antriebsleistung benötigt, welche den oben erwähnten Exergiestrom für den Kühlraum liefert sowie einen Exergieverluststrom, der irreversible Vorgänge innerhalb der nicht-vollkommen reversibel arbeitenden Kältemaschine kompensiert, einen Vorgang, den man auch Dissipation von technischer Arbeit nennt. Eine mechanisch angetriebene Kältemaschine nimmt über die Antriebswelle des Kompressors reine Exergie auf, wie in Bild 3.3 dargestellt. Die Leistungsbilanz des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik verlangt nun, dass die Summe des aufgenommenen Exergiestroms über den Kompressor und des aufgenommenen Nettoenergiestroms aus dem Kühlraum gleich dem Abwärmestrom ist. Im Idealfall wird die Abwärme annähernd bei Umgebungstemperatur an die Umgebung abgeführt und ist daher hier vereinfachend als reiner Anergiestrom angenommen.

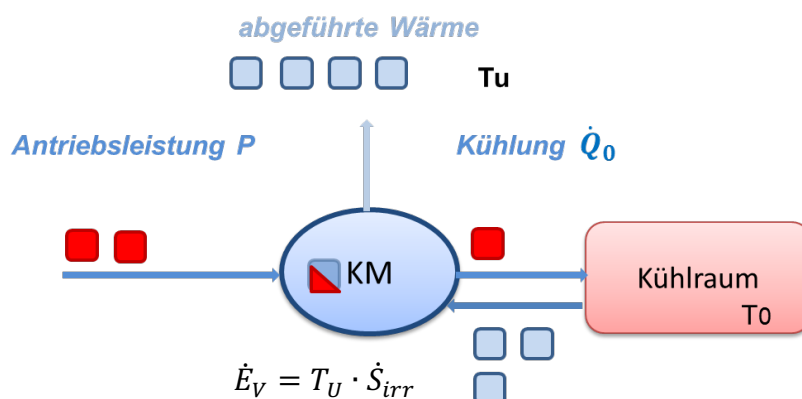


Bild 3.3: Schema der **Exergie**- und **Anergie**-Ströme einer **mechanisch** angetriebenen Kälteanlage (Kaldampf-Kompressionskälteanlage)

Im Fall einer thermisch betriebenen Kälteanlage muss dem Kühlraum der gleiche Exergiestrom zur Verfügung gestellt werden und es fallen dem Kältemaschinenprozess entsprechende Exergieverluste innerhalb der thermischen Kältemaschine an. Der Antrieb der thermischen Kältemaschine erfolgt jedoch durch einen Wärmestrom mit endlicher Temperatur, der sich abhängig von dieser Temperatur aus einem Exergie- und einem Anergieanteil zusammensetzt. Für die Bilanzen an der Kältemaschine ändert sich prinzipiell nichts; es muss nur der mit dem Antriebswärmestrom mitgeführte Anergieanteil zusätzlich als Abwärme abgeführt werden.

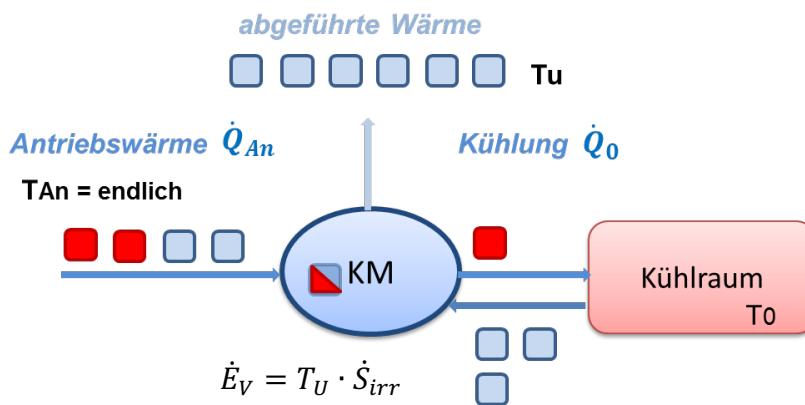


Bild 3.4: Schema der **Exergie**- und **Anergie**-Ströme einer **thermisch** angetriebenen Kälteanlage (Absorptionskälteanlage)

Die kennzeichnende Größe für die Leistungsfähigkeit einer Kältemaschine ist das Verhältnis aus Nutzen zu Aufwand: Der Nutzen ist die Kälteleistung, welche die Anlage dem Kühlraum bietet. Der Aufwand ist bei der mechanisch angetriebenen Kältemaschine die technische Antriebsleistung; das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand wird bei dieser Kältemaschine (z.B. mit mechanischem Kompressor) als Leistungszahl bezeichnet. Diese liegt, abhängig von den Einsatzbedingungen typischerweise zwischen 3 und 7 für reale Maschinen.

Bei der thermischen Kältemaschine ist der Aufwand der Antriebswärmestrom: das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand wird bei der thermischen Kältemaschine als Wärmeverhältnis bezeichnet. Dieses liegt für reale Maschinen deutlich unter der Leistungszahl der mechanisch angetriebenen Kältepumpen, bei 0,4 bis 0,75 für einstufige (single effect) Kältemaschinen und bei bis zu 1,3 für zweistufige (double effect) Kältemaschinen. Der große Unterschied beim Nutzen zu Aufwand wird einem schnell klar, da es, wie wir bereits gesehen haben, bei der Kältebereitstellung auf die Bereitstellung von Exergie ankommt. Die Antriebsleistung der mechanischen Kältemaschine besteht aus reiner Exergie, bei einer thermischen Kältemaschine liegt der Exergieanteil des Antriebswärmestroms, mit einer typischen Temperatur von 90°C bis 120°C, gerade bei 18 – 26 %, bei Standardumgebungsbedingungen von 20°C. Wenn wir also das Wärmeverhältnis von typischen einstufigen thermischen Absorptionskältemaschinen von 0,7, angetrieben von einem Wärmestrom mit der Temperatur von 110°C, auf die Ausbeute an Kälteleistung aus der zugeführten Exergie umrechnen, erhalten wir bei einer Umgebungstemperatur von 15°C im Keller einer Brauerei und damit einem Exergieanteil von $1-288/383 = 0,248$ eine Leistungszahl von 2,8. Würde man den Aufwand einer zweistufigen Maschine mit einem typischen Nennwärmeverhältnis von 1,3 betreiben und diesem mit einem Wärmestrom bei für diese Maschine notwendigen 130°C versorgen, erhielte man aus der Vergleichsberechnung einen Exergieanteil von 0,285 und eine Leistungszahl von 4,56. Dies zeigt uns, dass man mit aufwendiger gestalteten thermischen Kältemaschinen in der Praxis aus der Antriebsexergie durchaus vergleichbar hohe Kälteleistungen erhalten kann, wie bei den meistens eingesetzten mechanisch angetriebenen Kompressionskältemaschinen.

Es gibt bei der thermischen Kältemaschine drei Haupteinflussgrößen, welche das theoretische Wärmeverhältnis beeinflussen können:

Eine Temperaturerhöhung der Antriebswärme bei gleichem Exergiestrom führt zu einer Verringerung des Antriebswärmestroms und damit zu einem höheren Wärmeverhältnis.

Eine Erhöhung der Verdampfertemperatur (also der erreichbaren Kühlraumtemperatur) verringert den Temperaturunterschied bei der Wärmezufuhr in den Kühlraum, mit dem Effekt eines geringeren Exergieverluststroms, den die Kältemaschine kompensieren muss. Damit muss nur ein geringerer Exergiestrom mit der Antriebswärme bereitgestellt werden, der Antriebswärmestrom wird insgesamt geringer und das Wärmeverhältnis steigt.

Die Erhöhung der Kühlwassertemperatur führt dazu, dass die Abwärme bei einer höheren Temperatur und damit mit einem höheren Exergieanteil abgeführt werden muss. Diese Exergie muss vom Antriebswärmestrom zusätzlich bereitgestellt werden, das Wärmeverhältnis sinkt.

3.5. Techniken der Kälteerzeugung

Die Erzeugung von Kälte beruht auf der Verdampfung einer Flüssigkeit (normalerweise bei konstantem Druck und damit bei konstanter Temperatur), die dafür Verdampfungswärme benötigt, welche der Umgebung bzw. einem Kühlraum entzogen wird. Der zu verdampfende Stoff wird so gewählt, dass die Zustandsbedingungen beim Phasenwechsel (also der Verdampfung) zu der Kühlaufgabe passen und der Stoff zum Verdampfen viel Energie benötigt. Diese Stoffe, die durch Verdampfung Wärme entziehen, heißen Kältemittel.

Die direkte Verdampfung des Kältemittels im Kontakt mit der zu kühlenden Umgebung bzw. des zu kühlenden Mediums nennt man „direkte Kühlung“. Alternativ kann die Kälte in einem Verdampfer zunächst auf ein anderes frostsicheres Medium (oft als Sole bezeichnet) übertragen werden, welches dann als Kälteträger die Kühlung über einen weiteren Wärmeübertrager übernimmt; man spricht von „indirekter Kühlung“. Eine schematische Darstellung der Firma Linde in [Bild 3.6](#) zeigt das Prinzip der indirekten Kühlung. Der Kälteträger Sole überträgt die Kälte ohne dabei zu verdampfen. Die bei der Kühlaufgabe aufgenommene Wärme muss anschließend wieder durch Kühlung des Kälteträgers abgegeben werden. Durch Verluste bei der zusätzlichen Wärmeübertragung aufgrund eines benötigten Temperaturgefälles zwischen Kühlmedium und der zu kühlenden Umgebung von mindestens 3 bis 5 K, wird der Wirkungsgrad der Anlage gemindert. Eine direkte Kühlung stellt sich energetisch günstiger dar, ist aber aus Gründen der Sicherheit in Bezug auf den Kontakt teils aggressiver Kältemittel - wie das weit verbreitete Ammoniak - mit dem zu kühlenden Medium innerhalb eines möglicherweise undichten Wärmeübertragers, nicht immer erwünscht.

Das verdampfte kalte Gas des Kältemittels muss nach der Übertragung der Wärme wieder in den flüssigen Zustand überführt werden, um erneut verdampfen zu können. Nach der Art, wie das in einem Kältemittelkreislauf geschieht, werden Anlagen der mechanisch angetriebenen Kaltdampf-Kompressionskälteanlage (s. Kap. 3.5.2.) und der thermisch angetriebenen Sorptionskälteanlagen (s. Kap. 3.5.3.) unterschieden.

3.5.1. Kühlung unter Nutzung der Umgebungsbedingungen – Adiabate Verdunstungskühlung

Vorab sei hier noch auf die einfachste Art der Kühlung eingegangen, die allerdings nicht auf einer Kreislauflührung des Kältemittels mit Phasenwechseln auf unterschiedlichen Druckniveaus und damit Temperaturniveaus beruht. Bei der Verdunstungskühlung wird gewöhnlich Wasser verdunstet und die dazu benötigte Wärme (Verdampfungsenthalpie) wird dabei der Umgebung oder auch dem im flüssigen Zustand verbleibenden Wasser entzogen. Der Kühleffekt hängt dabei nicht so sehr von der Temperatur der Umgebung als viel mehr von deren relativer Feuchte ab. Bei einer Luft mit relativer Feuchte nahe 100% (bei nebligem oder regnerischem Wetter) kann praktisch kein Wasser verdunsten und somit Verdunstungswärme von der Umgebung oder vom zu kühlenden Wasser aufnehmen. Je niedriger die relative Feuchte ist, desto höher ist aber das Potential weiterer Feuchtigkeitsaufnahme, desto mehr Wasser kann also verdunsten. Kältere Außenluft kann jedoch einen warmen Stoffstrom kühlen. Eine Umgebungsluft mit relativer Feuchte von nahe 100% kann jedoch, wenn ihre Temperatur deutlich unter der Temperatur des zu kühlenden Wassers so geführt werden, dass sie durch Erwärmung im Kontakt mit dem warmen Wasser zunächst bei konstanter absoluter Feuchte erwärmt und dann mit reduzierter relativer Feuchte zur Aufnahme von Wasser bereit ist. Die Verdunstungskühlung benötigt keine Zufuhr von mechanischer oder thermischer Energie; sie ist ein natürlicher ablaufender Prozess.

Anwendung findet dieses Prinzip beim Betrieb von (Nass-)Kühltürmen, auch als Rückkühlwerke bezeichnet. Die Verdunstungskühlung ist daher nur für die Abfuhr von Wärmeströmen vorgesehen, bei der eine Nutzung der Wärme an anderer Stelle nicht möglich oder vorgesehen ist.

3.5.2. Kaltdampf-Kompressionskälteanlage

Kompressionskälteanlagen erhalten ihren Namen von der Kompression des Arbeitsmittels in einem Kältekreislauf, die durch einen mechanisch bzw. elektrisch angetriebene Kompressor bewerkstelligt wird.

Das Grundprinzip von Kompressionskälteanlagen ist die Nutzung zweier unterschiedlicher Druckniveaus für den Phasenwechsel (Verdampfung und Kondensation) eines Arbeitsstoffes, dem Kältemittel, und mit dem Phasenwechsel einhergehend die Aufnahme und Abgabe von Verdampfungswärme, jeweils bei den, den Druckniveaus, entsprechenden Temperaturen:

- ❖ Die verdampfende Flüssigkeit nimmt Wärme auf tiefem Temperatur- bzw. Druckniveau auf und kühlt die Umgebung (über den Verdampfer)
- ❖ Kondensierender Dampf gibt an anderer Stelle auf höherem Temperatur- bzw. Druckniveau die Verdampfungswärme wieder ab (über den Kondensator).

Das Kältemittel durchläuft dabei in einer Kältemaschine einen dauernden Kreisprozess. Dabei ist das Kältemittel im Hinblick auf die vom Druckniveau abhängige Verdampfungstemperatur für die jeweilige Kühlaufgabe auszuwählen. Diese schreibt zumeist vor, bei welcher tiefen Temperatur die Wärme aus dem Kühlraum aufzunehmen ist und welche Mindesttemperatur bei der Wärmeabgabe an die Umgebung nötig ist. Daneben sollte das Kältemittel auch über eine große Verdampfungsenthalpie verfügen, um den Kreislauf mit kleinen umlaufenden Kältemittelmengen betreiben zu können.

Bei der Kompressions-Kältemaschine sorgen der Kompressor und das Expansionsventil im Kältekreislauf für unterschiedliche Druck- bzw. Temperaturniveaus bei Verdampfung und Kondensation des Kältemittels.

Hinter dem Expansionsventil liegt das Kältemittel zum größten Teil noch in der flüssigen Phase (mit einem geringen gasförmigen Anteil) im sogenannten Nassdampfgebiet vor. Der Druck ist durch den Vorgang der Drosselung relativ gering und damit die mit dem Druck korrelierende Temperatur, bei der die Verdampfung des Kältemittels stattfindet. Diese Temperatur muss jetzt so eingestellt sein, dass sie unterhalb der Temperatur des zu kühlenden Raumes liegt; dann kann dem Kühlraum durch Wärmetransport über den vom Kältemittel durchströmten Wärmeübertrager (Verdampfer) weiterhin Wärme entzogen werden; die Wärme strömt vom Kühlraum zum noch tiefer temperierten Kältemittel, welches diese Wärme unter Beibehaltung der Temperatur (bei der Verdampfungstemperatur des entsprechend niedrigen Drucks) als Verdampfungswärme aufnimmt und beim Durchlaufen des Verdampfers einen zunehmend höheren Dampfanteil erreicht. Idealerweise ist die Anlage so geregelt, dass den Verdampfer nur gasförmiges Kältemittel verlässt, damit der anschließende Verdichter nicht durch Flüssigkeitsanteile mechanischen Schaden nimmt. Der mechanisch angetriebene Verdichter sorgt nun für eine Druckerhöhung des Kältemittels auf ein Niveau, das ausreichend ist, um das gasförmige Kältemittel beim Durchlaufen des anschließenden Wärmeübertragers (dem Verflüssiger oder Kondensator) eine Kondensationstemperatur beibehalten kann, die oberhalb der Temperatur der Umgebung liegt, an welche das Kältemittel seine Wärme abgeben soll. Das im Kondensator vollständig verflüssigte Kältemittel gelangt nun wieder in das Expansionsventil, und der Kreislauf ist damit geschlossen.

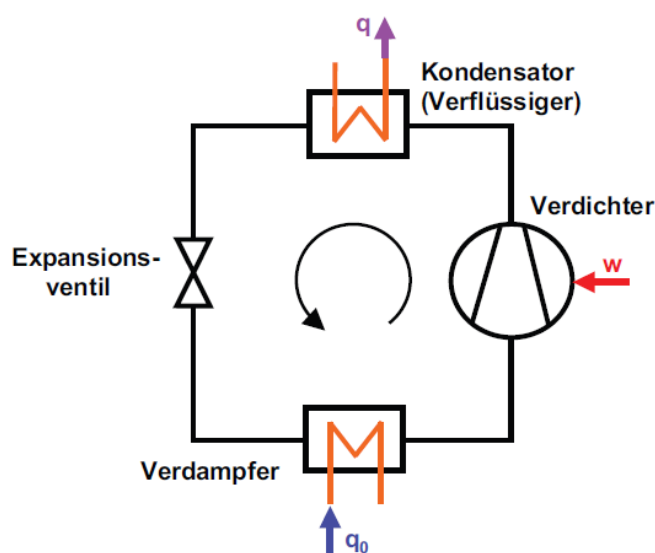


Bild 3.5: Fließbild einer Kompressions-Kältemaschine

Dieser Kreislauf der Kompressionskälteanlage bedarf einer der Kühllast entsprechenden Regelung des Kompressors wie auch des Expansionsventils. Der Kreislauf und seine Komponenten sind hier vereinfacht dargestellt. Der Vorteil der Kompressionskälteanlage ist, dass sie quasi in beliebiger

Größenordnung dimensioniert werden kann, sehr schnell beim An- und Abschalten reagiert, und es eine große Anzahl an Kältemitteln für die verschiedenen Anwendungen gibt. Allerdings handelt es sich bei den meisten dieser Kältemittel um Fluor-Kohlenwasserstoffe (FKW), von denen die meisten ein hohes globales Erwärmungspotential (GWP) aufweisen, also hochgradig „klimaschädlich“ sind. Die Vorgängergeneration der FKWs, die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW) zeigten ein stark schädigendes Potential bezüglich der Ozonschicht der Erdatmosphäre. Diese Kältemittel sind inzwischen weitestgehend verbannt.

In der Industrie ist der Einsatz von Ammoniak als Kältemittel weit verbreitet. Auch wenn Ammoniak als Gas zu starken Reizungen und Verätzungen der Atemwege führen kann und bei hoher Temperatur und Vermischung mit Luft explosiv ist (Kunze (2016)) sowie als wassergefährdender Stoff der Gefährdungsklasse 2 vom Grundwasser ferngehalten werden muss, hat man es in der Praxis, auch in Brauereien, gut im Griff. Wie gewöhnliche Flüssigkeiten vollzieht auch das Ammoniak seinen Phasenwechsel von flüssig zu gasförmig oder umgekehrt unter der Bedingung eines konstanten Druckes bei einer korrespondierenden konstanten Temperatur; unter Normaldruck von 1 bar beträgt diese Temperatur $-33,8^{\circ}\text{C}$. Eine Verflüssigung bei höheren Temperaturen in einem Kondensator erfolgt z.B. bei ca. 30 bar und ca. 65°C . Die Paarwerte können aus Tabellen oder einem lg p-h Diagramm (Druck-Wärmeinhalt Diagramm) für Ammoniak entnommen werden.

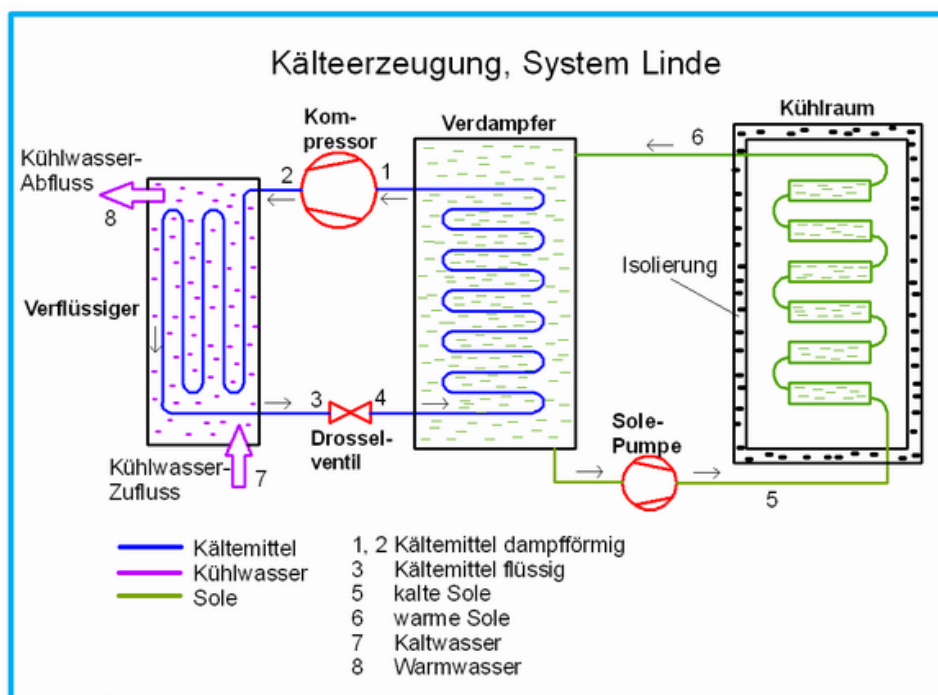


Bild 3.6: Indirekte Kühlung mit Kältemittelkreislauf (blau), Solekreislauf (grün) und Wärmeabfuhr über Kühlwasser (violett)

(www.heureka-stories.de)

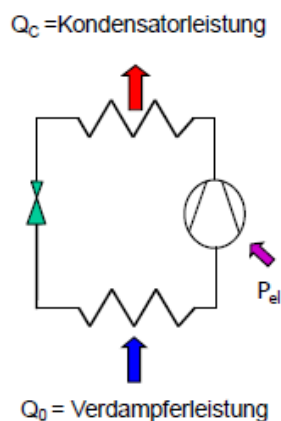
3.5.3. (Ab-)sorptionskälteanlagen

Der Vorgang der Verdichtung des Kältemittels beim Kompressionskältemaschinen-Prozess erfolgt durch den mechanischen Kompressor, der das gasförmige Kältemittel verdichtet.

Beim thermischen Kältemaschinen-Prozess, welcher in der Absorptionskältemaschine mit einem Gemisch aus Kälte- und Lösungsmittel arbeitet ist die treibende Kraft die Sorption, die reversible Anlagerung eines Stoffes (hier des Kältemittels, z.B. Wasser) an ein Lösemittel (z.B. Lithiumbromid), welches eine hohe Affinität zu dem Kältemittel besitzt. Die handhabungsfreundliche Kombination Wasser/Lithiumbromidlösung ist für Kühlungsaufgaben mit Kühltemperaturen oberhalb von 6°C geeignet. Für Temperaturen bis -50°C wird das Kältemittel Ammoniak (mit dem Lösungsmittel Wasser) eingesetzt. Einige Vor- und Nachteile sowie Betriebs- und Einsatzbedingungen der Anlagen für den Einsatz dieser weit verbreiteten beiden Lösungsmittel/Kältemittel Stoffpaare sind in Bild 3.10 aufgelistet.

Die Verdichtung des Kältemittels auf ein höheres Druckniveau wird durch einen Pumpvorgang des im Lösungsmittel als Flüssigkeit gelösten Kältemittels nach der Absorption erreicht. Das Lösungsmittel bietet sich durch Einsprühen in den Absorber dem lösungsmittellaffinen Kältemittel bei einem niedrigen Druck an, wodurch im vorgelagerten Verdampfer die Verdampfung des Kältemittels betrieben wird (apparatebauliches Schema in Bild 3.7).

Kompressionskältemaschine



Absorptionskältemaschine

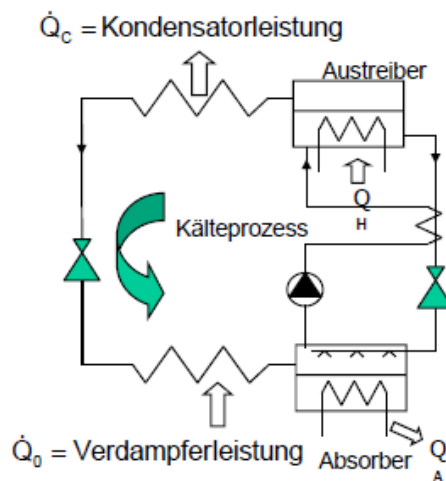


Bild 3.7: Vergleich des Funktionsprinzips von Kompressions- und Absorptionskältemaschine (BHKW-Infozentrum)

Der **Kältemittel-** und **Lösungsmittelkreislauf:**

Entsprechend dem verfahrenstechnischen Schema des Anlagenprozesses für eine Lithiumbromid-Wasser Absorptionskälteanlage im Bild 3.8, wird mit der **zugeführten Heizenergie** im Austreiber (auch Desorber oder Kocher genannt) das Kältemittel Wasser aus einer schwachen Lithiumbromidlösung heraus verdampft und im anschließenden **Kondensator mittels Kühlwasser**

kondensiert (verflüssigt). Die Verdampfungswärme wird über das Kühlwasser als Abwärme aus dem System gebracht und an die Umgebung abgegeben. Im **Austreiber** bleibt eine **konzentrierte Lithiumbromid-Lösung** zurück.

Über ein Drosselventil wird das flüssige Kältemittel (Wasser), wie bei der Kompressionskältemaschine dem **Verdampfer** zugeführt und dort bei **sehr niedrigem Druck verdampft**. Dabei nimmt es **Wärme (die Kälteleistung) vom Kaltwassernetz** bei niedriger Temperatur auf. Der niedrige Druck wird durch Absorbieren des Wassers im angeschlossenen Absorber aufrechterhalten.

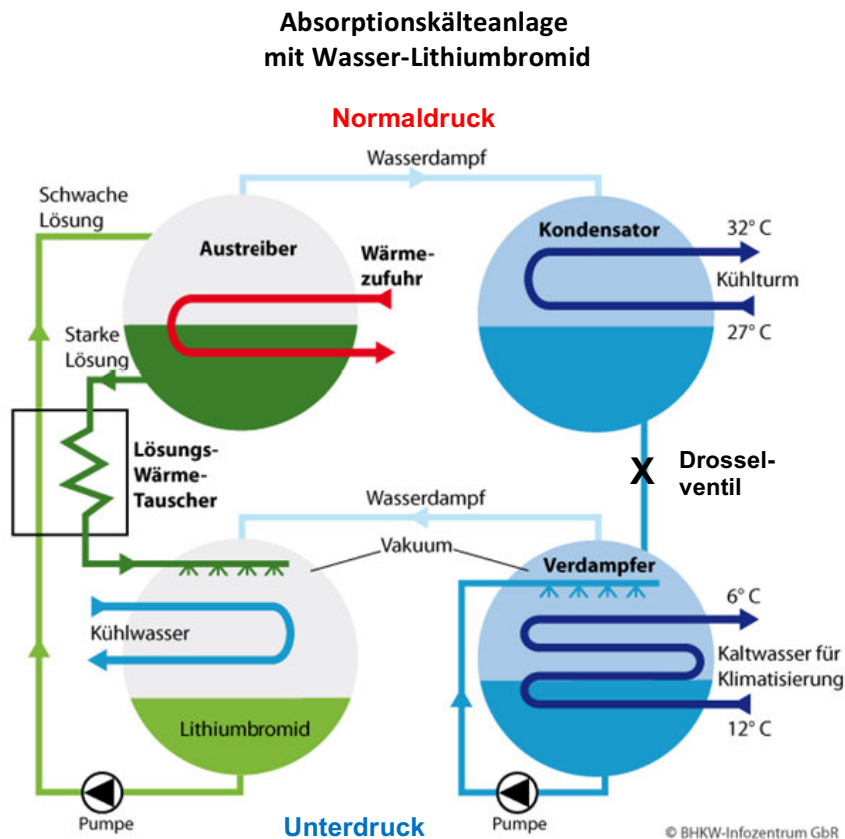


Bild 3.8: Schema des Anlagenprozesses (BHKW-Infozentrum)

Der dem **Absorber** zuströmende **Wasserdampf** wird durch versprühte starke Lösung von Lithiumbromid **absorbiert**. Die entstehende Wärme (Verdampfungsenthalpie) wird über das Kühlmittel abgeführt. Die Lithiumbromidlösung wird durch das Absorbieren schwächer, sie wird wieder mit erhöhtem Druck zum Austreiber gepumpt – so schließt sich der Kreislauf.

Die charakteristische Kenngröße für die Leistungsfähigkeit der thermisch angetriebenen Absorptionskältemaschine ist das Verhältnis des Kälteleistungsstroms \dot{Q}_0 (Nutzen) und dem Antriebs- oder Heizwärmestrom \dot{Q}_h (Aufwand), das Wärmeverhältnis ζ .

Der Kälteleistungsstrom entspricht, bei einer mechanisch mit der Leistung P angetriebenen Kompressionskältemaschine, dem Produkt aus der Antriebsleistung und der aus dem Verhältnis von Kälteleistungsstrom und Antriebsleistung gebildeten Leistungszahl ε_{KM} . Der Antriebswärmestrom könnte in einer Wärmekraftmaschine, diese für den Antrieb der Wärmepumpe benötigten Leistung

P , erzeugen. Die thermisch angetriebene Absorptionskältemaschine lässt sich also durch die Reihenschaltung aus Wärmekraftmaschine (WKM) und mechanisch angetriebene Kältemaschine (KM) ersetzen und es gilt, dass sich das Wärmeverhältnis der Absorptionskältemaschine aus dem Produkt der Leistungszahl einer Kompressionskältemaschine und dem thermischen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine berechnen lässt:

$$\zeta_{AKM, max} = \frac{\dot{Q}_0}{\dot{Q}_h} = \frac{\dot{Q}_{Verdampfer}}{\dot{Q}_{Austreiber}} = \frac{P \cdot \varepsilon_{KM}}{\frac{P}{\eta_{WKM}}} = \eta_{WKM} \cdot \varepsilon_{KM}$$

Eine entsprechende Umrechnung zwischen der Wärmezahl der Absorptionskältemaschine und der Leistungszahl einer Kompressionskältemaschine wurde in Kapitel 3.4. über den Exergieanteil des Antriebswärmestroms der Absorptionskältemaschine zur Vergleichbarkeit der „Wirkungsgrade“ der beiden Maschinentypen bereits vorgenommen.

Für ideale, reversibel-adiabat arbeitende Maschinen ergibt sich aus dem Carnot-Wirkungsgrad für die Wärmekraftmaschine und der Carnot-Leistungszahl für die Kältemaschine:

$$\eta_{WKM, ideal} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}} = 1 - \frac{T_{Absorber}}{T_{Austreiber}}$$

$$\varepsilon_{KM, ideal} = \frac{T_{zu}}{T_{ab} - T_{zu}} = \frac{T_{Verdampfer}}{T_{Kondensator} - T_{Verdampfer}}$$

Mit $T_{Kondensator} \approx T_{Absorber} \geq T_U$ folgt für das Wärmeverhältnis der thermisch angetriebenen Absorptionskältemaschine:

$$\zeta_{AKM, max} = \frac{T_{Austreiber} - T_U}{T_{Austreiber}} \cdot \frac{T_{Verdampfer}}{T_U - T_{Verdampfer}}$$

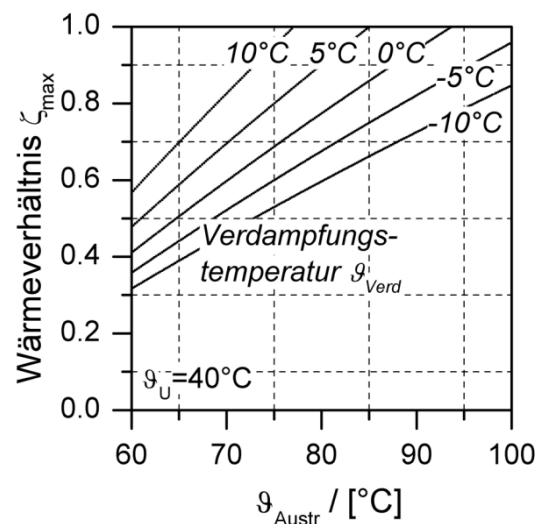
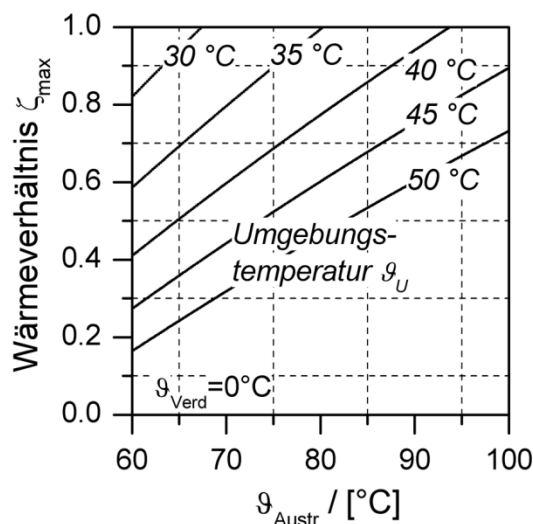


Bild 3.9: Wärmeverhältnis für die Absorptionskältemaschine als Funktion des Antriebswärmestroms im Austreiber, mit den Parametern Umgebungstemperatur (Graph links) und Temperatur der Kältebereitstellung im Verdampfer (Graph rechts) (itw – Uni Stuttgart)

Die graphische Darstellung der hergeleiteten Beziehung für das maximal erreichbare Wärmeverhältnisse $\zeta_{AKM,max}$ in einer idealen thermischen Kältemaschine in Abhängigkeit von der Temperatur des Antriebswärmestroms $T_{Austreiber}$ (oder auch mit ϑ_{Austr} bezeichnet) ist für die Parameter Umgebungstemperatur und Verdampfer Temperatur in **Bild 3.8** zu sehen.

Mit steigender Umgebungstemperatur fällt der Exergieanteil des Antriebswärmestroms, und damit die Kälteleistung. Andererseits steigt bei gleicher Umgebungstemperatur mit der Temperatur des Antriebswärmestroms der Anteil des Exergieanteils, also auch die Kälteleistung.

Mit höheren Ansprüchen an die Temperatur (also niedrigere Temperatur), mit der die Kälteleistung bereit gestellt wird, steigt der Exergieverluststrom bei der Übertragung des Wärmestroms aus der Umgebung an den Kühlraum. Folglich muss ein größerer Exergiestrom zur Deckung dieses Exergieverluststromes von der Kältemaschine bereitgestellt werden. Für eine feste Temperatur des Antriebswärmestroms bedeutet das, dass dieser Antriebswärmestrom größer werden muss, um dieselbe Kälteleistung zu erzeugen; das Wärmeverhältnis sinkt. Mit einer Erhöhung der Temperatur des Antriebswärmestroms, kann die Absenkung der Verdampfer Temperatur, und damit der Temperatur für die Kälteleistung, unter Beibehaltung des Wärmeverhältnisses kompensiert werden.

mattes
engineering gmbh

Verfügbare Verfahren, Arbeitsmittel

	Lithium-Bromid Absorption	Ammoniak-Wasser Absorption
Kältemittel	Wasser	Ammoniak
Lösungsmittel	Lithium-Bromid-Lösung	Wasser
giftig brennbar ätzend Geruch	kaum nein nein nein	ja kaum ja stechend
Arbeitsdruck Verdampfer Kondensator	8 mbar (Vakuum) 40 mbar (Vakuum)	200 mbar bis 3000 mbar 10 bar bis 15 bar
Hauptanwendung	Kaltwassererzeugung > 4,5°C	Verdampfungstemperaturen bis -60°C
Einsatzmöglichkeiten	Klimatechnik	industrielle Kälteerzeugung
Aufstellung	im Gebäude	im Freien möglich
Bauweise	Kompaktsatz	Modul- oder Standardanlagen

Bild 3.10: Option der gängigsten Arbeitsmedien (Kälte-/Lösungsmittel) in Absorptionskältemaschinen (Mattes)

4. Wärme

4.1. Thermodynamische Qualität der Wärme

Wärme ist die Energieform, in welche letztendlich alle anderen Energieformen am Ende einer Kette von Prozessen umgewandelt werden. Jede Energieform lässt sich ohne Aufwand, d.h. ohne Zuhilfenahme technischer Arbeit oder die Änderung des Zustands der Umgebung des Systems, in dem die Umwandlung stattfindet, in Wärme umwandeln. Im Gegensatz zu anderen Energieformen gibt es bei der Wärme jedoch unterschiedliche Qualitäten dieser Energieform. So enthält Wärme einen Energieanteil, der sich in einem idealen Prozess in jede andere Energieform umwandeln lässt; er nennt sich Exergie der Wärme. Der verbleibende Energieanteil, die Anergie der Wärme, lässt sich nicht umwandeln. Zu den Energieformen, die aus reiner Exergie bestehen, gehört die technische Arbeit, die elektrische Energie, chemische Bindungsenergien z.B. charakterisiert durch die Heizwerte von Brennstoffen, nukleare Bindungskräfte, wie sie in der Kernkraft freigesetzt werden, sowie potentielle und kinetische Energien. Bei der Wärme bestimmt die thermodynamische Temperatur der Wärme sowie die thermodynamische Temperatur der Umgebung, in der ein Prozess zur Übertagung der Wärme stattfindet, den Exergieanteil der Wärmeenergie, und damit die Grenze für den Anteil der Wärme, der in einem idealen Prozess z.B. in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Diesen Zusammenhang haben wir bereits in der Definitionsgleichung für die Exergie der Wärme in Kapitel 3 kennen gelernt:

$$\dot{E}_Q := \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_U}{T}\right)$$

Der Exergiewärmestrom \dot{E}_Q eines Wärmestroms \dot{Q} ist umso größer je höher die Temperatur des Wärmestroms im Vergleich zur Umgebungstemperatur ist. Dieser Exergieanteil entspricht der maximal gewinnbaren Leistung eines idealen Wärme-Kraft Prozesses, bei dem dieser Wärmestrom zur Verfügung gestellt wird und die Leistung und Abwärme abgeführt werden.

Herleiten lässt sich diese Beziehung $P_{max} = \left(1 - \frac{T_U}{T_{zu}}\right) \cdot \dot{Q}_{zu}$

aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik (Leistungsbilanz) für das geschlossene System der Wärme-Kraft- Maschine, also für den geschlossenen Arbeitsmittelkreislauf des Prozesses, bei dem die Bilanz für eine Systemgrenze erfolgt, über die kein Massenstrom fließt:

$$\dot{Q}_{zu} + \dot{Q}_{ab} + P = 0$$

Es werden folglich nur die zugeführten Antriebswärmeströme und die von der Maschine abgegebene Leistung sowie der Abwärmestrom im stationären Zustand bilanziert.

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik (Entropiestrombilanz) stellt eine Bilanz für die Zustandsgröße Entropie im stationären Betrieb der Wärme-Kraft-Maschine dar. Die zu- und abgeführten Wärmeströme transportieren, abhängig von ihren thermodynamischen Temperaturen, Entropieströme in das System hinein und heraus. Die technische Leistung ist als Energieform, bestehend aus reiner Exergie, entropiefrei und transportiert daher keine Entropie aus dem System. Entropie wird jedoch durch irreversible Prozessanteile des Wärme-Kraft-Prozesses in der realen Maschine erzeugt und liefert damit den Quellterm >0 für die Entropie. Eine Entropievernichtung ist thermodynamisch nicht

möglich; Entropie kann aus einem System nur über den Transport von Materie oder, wie in diesem Fall, über Wärmeströme, welche die Systemgrenze überschreiten, aus dem System transportiert werden:

$$\frac{\dot{Q}_{zu}}{T_{zu}} + \frac{\dot{Q}_{ab}}{T_{ab}} + \dot{S}_{irr} = 0$$

Mit dem Einsetzen der Leistungsbilanz in die Entropiestrombilanz, durch Ersetzen des Abwärmestroms, erhält man die nach der abgeführten Leistung umgeformte Gleichung

$$P = \left(1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}\right) \cdot \dot{Q}_{zu} - \dot{S}_{irr} \cdot T_{ab}$$

Das maximale Potential an umwandelbarem Anteil der zugeführten Wärme ist nur in einer ideal arbeitenden Wärme-Kraft-Maschine zu heben, wenn also der Quellterm der erzeugten Entropie verschwindet und die Temperatur der Abwärme nahe der Umgebungstemperatur liegt:

$$\dot{S}_{irr} = 0 \quad \text{und} \quad T_{ab} \rightarrow T_U$$

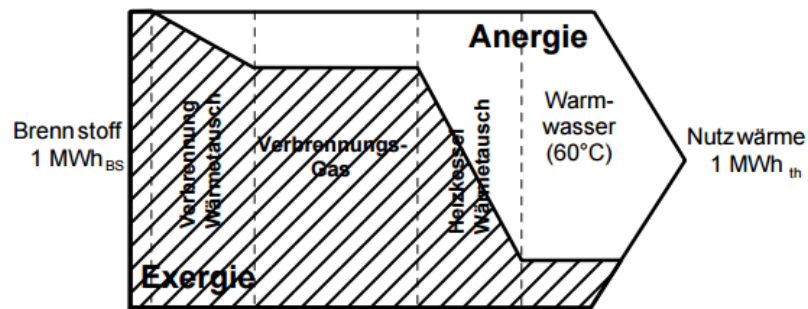
Man erhält damit obige Gleichung für P_{max} bzw. die Exergie der Wärme.

Den Exergieanteil eines Wärmestroms zu kennen bzw. die Temperatur, bei der die Wärme im Verhältnis zur Temperatur der allgemeinen Umgebung vorliegt, ist aus zwei Gründen wichtig für die Praxis:

Wärme mit einer hohen Temperaturdifferenz zur Umgebung hat immer noch ein entsprechendes Potential durch einen Wärme-Kraft-Prozess Arbeit (s. Bild 4.2) zu verrichten, Wärme mit einer Temperatur nahe der Umgebungstemperatur hat dieses Potential nicht. Zum anderen erfordert die Einspeisung von Wärme in ein Wärmenetz bzw. die Übertragung der Wärme an ein System, welches Wärme benötigt, dass die Temperatur der Wärmequelle höher ist als die Temperatur des Netzes bzw. des Systems. Wärmequellen mit relativ niedriger Temperatur lassen sich dann nur unter Einsatz von Wärmepumpen auf ein nutzbares Temperaturniveau anheben, um nicht als Abwärme an die Umgebung abgeführt werden zu müssen.

Um die Qualität der Wärme, die ursprünglich aus Primärenergieträgern gewonnen wurde, möglichst ressourcenschonend zu nutzen, sollte sie bei Umwandlungs- bzw. Nutzungsprozessen möglichst so eingesetzt werden, dass das Arbeitspotential des Exergieanteils für entsprechend höherwertige energetische Aufgaben genutzt wird, z.B. zur Erzeugung mittels fossiler Brennstoffe nur aufwendig erzeugbare technische Arbeit oder Strom, durch Einspeisung in einen Wärme-Kraft-Prozess (s. Bild 4.2) oder als Antrieb einer thermisch betriebenen Kältemaschine. Andernfalls sollte über ein möglichst kleines treibendes Temperaturgefälle Wärme an ein anderes Medium übertragen werden, das eine Erwärmung auf ein fast ebenso hohes Temperaturniveau erfahren soll, oder bei dem die Verfeuerung von fossilen Brennstoffen oder auch anderweitig nutzbaren erneuerbaren Brennstoffen verdrängt werden kann.

So ist die Erzeugung von Warmwasser bei 60°C durch Verbrennung von Erdgas oder Heizöl, wie in Bild 4.1 anhand eines Exergie-/Anergie-Fließbildes dargestellt, eine sehr ineffektive Nutzung des energetischen Potentials des eingesetzten Primärenergiebrennstoffes.



... bei großen Temperaturabsenkungen



Bild 4.1: Exergie-/Anergie-Fließbild der Nutzung von Verbrennungsgasen eines Primärenergieträgers zur Warmwasserbereitstellung

(Schmitz (2005))

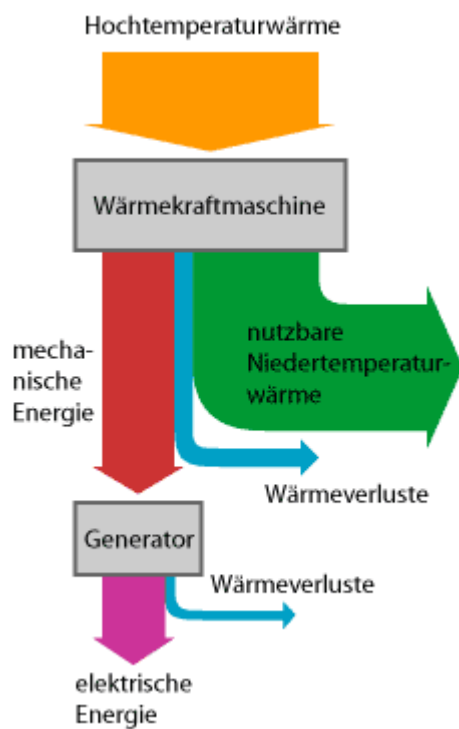


Bild 4.2: Sankey-Diagramm zur Umwandlung von Wärme in technische Arbeit und Abwärme in einer Wärme kraftmaschine (Energie-Lexikon)

4.2. Wärmequellen

4.2.1. Wärmeversorgung

Die Versorgung von Industrie, Gewerbe und Wohnquartieren mit Wärme, durch die Kommunale Energieversorgung, geschieht entweder über ein Fernwärmenetz, ein Nahwärmenetz oder es erfolgt eine dezentrale Erzeugung von Wärme, wie in den meisten Einfamilienhäusern durch eine Heizöl- oder Erdgaskesselfeuerung im Keller des Hauses, oder auch in vielen Industriebetrieben, die meist mit Erdgas befeuerten Heizkesseln Wärme erzeugen.

Die Fernwärme wird zentral für einzelne Stadtteile oder eine ganze Stadt in reinen Heizwerken (HW) oder Heizkraftwerken (HKW) durch die Verbrennung der Primärenergieträger Kohle, Heizöl oder Erdgas erzeugt. In den reinen Heizwerken wird entsprechend der dezentralen Heizung für Einzelhäuser aus dem Brennstoff nur Wärme erzeugt. Die durch den zentralen, optimierten Verbrennungsprozess erreichbaren Wirkungsgrade bei der Ausnutzung der Primärenergie mögen verglichen mit herkömmlichen Dezentralen Anlagen recht hoch sein, jedoch gehen diese Vorteile spätestens durch die Transportverluste in den Fernwärmeleitungen zum Verbraucher wieder verloren.

Die inzwischen übliche Form der Fernwärmeversorgung sind sogenannte Gas- und Dampfkraftwerke (GuD). Hier werden in dem krafterzeugenden Anlagenteil die ca. 1400 °C heißen, sauberen Verbrennungsgase aus der Verbrennung des Primärenergieträgers Erdgas in einer Gasturbine zur Erzeugung von technischer Arbeit genutzt. Die Abgase aus der Gasturbine liegen bei Temperaturen von immer noch mindestens 600°C vor und lassen sich zur Dampferzeugung in einem Dampfkessel nutzen, der Teil eines Dampfturbinenkreislaufs ist. Die in diesem Dampfkreisprozess mit ca. 550 bis 600°C heißem Dampf beaufschlagte Turbine liefert ebenfalls technische Arbeit. Je nach Ausbau der niederen Druckstufe der Turbine lässt sich der Dampf in diesem Kreislauf auf Drücke im Bereich von 10-tel Bar entspannen, wobei diese Turbine auf maximale Auskopplung von technischer Arbeit getrimmt ist. Die Abwärme hat bei solchen Anlagen dann jedoch nur noch eine Temperatur von ca. 30-40°C, und lässt sich zur Fernwärmeversorgung nicht mehr nutzen, und wird als Abwärme an nahegelegene Flüsse abgegeben. Alternativ zu diesen reinen Kraftwerken kann man die Turbine als Gegendruckturbine bauen, die bereits den Dampf bei höheren Drücken und Temperaturen aus der Turbine entlässt, was dann die Nutzung dieser Wärme bei ca. 150 °C zur Fernwärmeversorgung ermöglicht, wobei Abstriche bei dem thermischen Wirkungsgrad der Turbine, also dem Verhältnis der Erzeugten Nutzleistung zum Antriebswärmestrom, gemacht werden müssen. Anlagen, die eine flexible Fernwärmebereitstellung ermöglichen sollen, können einen Teil des Dampfes nach einer Hochdruckstufe der Turbine zu Heizzwecken bereits bei höherem Druck und Temperatur auskoppeln, und den Rest des Dampfes in einem Niederdruckteil zur weiteren Nutzleistungserzeugung zu tieferen Drücken und Temperaturen entspannen lassen. Ein Beispiel für ein modernes GuD Heizkraftwerk ist das Heizkraftwerk Linden der Stadtwerke Hannover. Es hat im Nennbetrieb eine elektrische Leistung von 255 MW und liefert zugleich 185 MW Fernwärme. Damit werden im Stadtteil Linden 35.000 Kunden (Stand 2007) versorgt. Der elektrische Wirkungsgrad des Heizkraftwerks liegt bei 53–55%. Bei reinen Kraftwerken, die nicht auf Fernwärmebetrieb ausgelegt sind werden bislang elektrische Wirkungsgrade von maximal 62% erreicht.

Eine Alternative zu Fernwärmenetzen sind sogenannte Nahwärmenetze. Nahwärme wird in kleineren Wärmeerzeugungsanlagen, dezentral für kleinere Siedlungen, Gebäudekomplexe und Industriekunden bereitgestellt. Große Gas- und Dampfturbinenanlagen zur Ausbeute des größeren Teils der

Exergie der Wärme aus der Primärenergieverbrennung lassen sich im kleineren Maßstab nicht und sind auch nicht so flexibel in der Bedarfsanpassung. Typisch sind daher kleinere Anlagen, die unter dem Oberbegriff Blockheizkraftwerke (BHKW) zusammengefasst werden und ebenfalls, wie die großen Heizkraftwerke nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) arbeiten.

4.2.2. Kraft-Wärme-Kopplung

Kopplung bedeutet in der Physik allgemein die Wechselwirkung zwischen physikalischen Systemen. In der Welt der Elektronik wird damit die Art und Größe einer Verbindung zwischen elektrischen Signalen bezeichnet und in der Softwareentwicklung ist Kopplung ein Maß für die Abhängigkeit zwischen Modulen.

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist in der Energietechnik die Bezeichnung für ein Prinzip, dass bereits bei den Heizkraftwerken und den Blockheizkraftwerken angesprochen wurde, die gleichzeitige Gewinnung von mechanischer und thermischer Nutzenergie aus anderen Energieformen (Primärenergieträgern) mittels eines thermodynamischen Prozesses in einer technischen Anlage (s. Bild 4.3). Durch den in der energietechnischen Anlage realisierten Prozess, z.B. Gasturbinen-, Dampfturbinen, Hubkolben-Verbrennungsmotor, besteht ein annähernd festgelegtes Größenverhältnis zwischen der gewonnenen mechanischen und der thermischen Nutzenergie. Industrietypische Prozesse mit ihren Nennleistungsbereichen und elektrischen Wirkungsgraden sind in Bild 4.4 dargestellt.

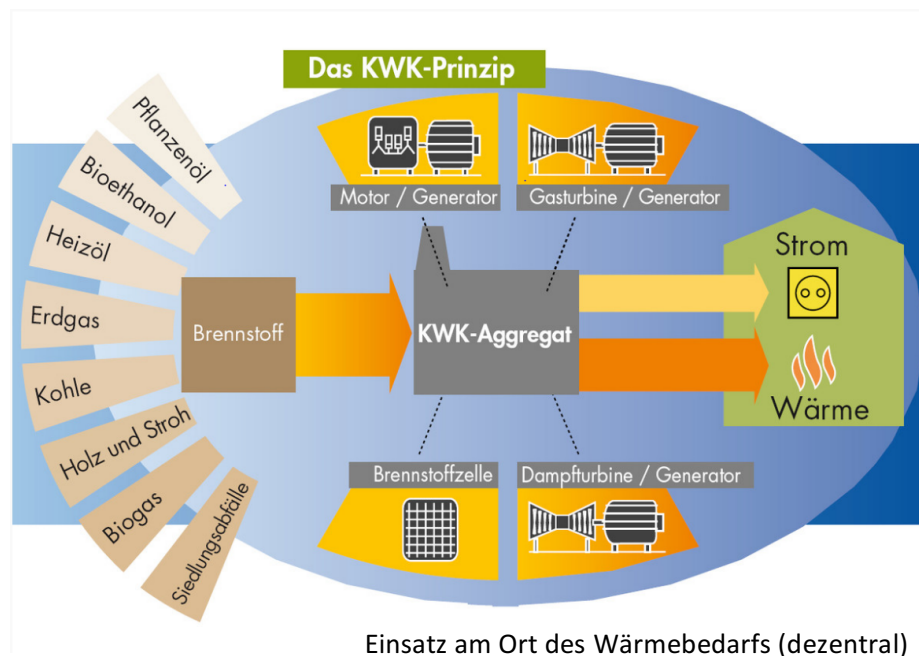


Bild 4.3: Dezentrale Wärmekraftmaschinen nach dem KWK-Prinzip als BHKW (Suttor (2014))

Bei allen Umwandlungsprozessen von Energie entsteht Wärme. Ein Anteil dieser Abwärmeerzeugung ist naturgesetzlich, d.h. thermodynamisch notwendig, wie bei den Wärmekraftprozessen, ein anderer Anteil ergibt sich aus der Unvollkommenheit des technischen Prozesses.

Der Wärmekraftprozess bzw. die Kraft-Wärme-Kopplung als Prinzip hinter diesem Prozess gilt für alle Prozesse die Primärenergieträger in einem KWK-Aggregat/ einer Wärmekraftmaschine verbrennen und in mechanische oder elektrische Energie einerseits und Wärme andererseits umwandeln, gleich.

Übersicht industrieller KWK-Technologien

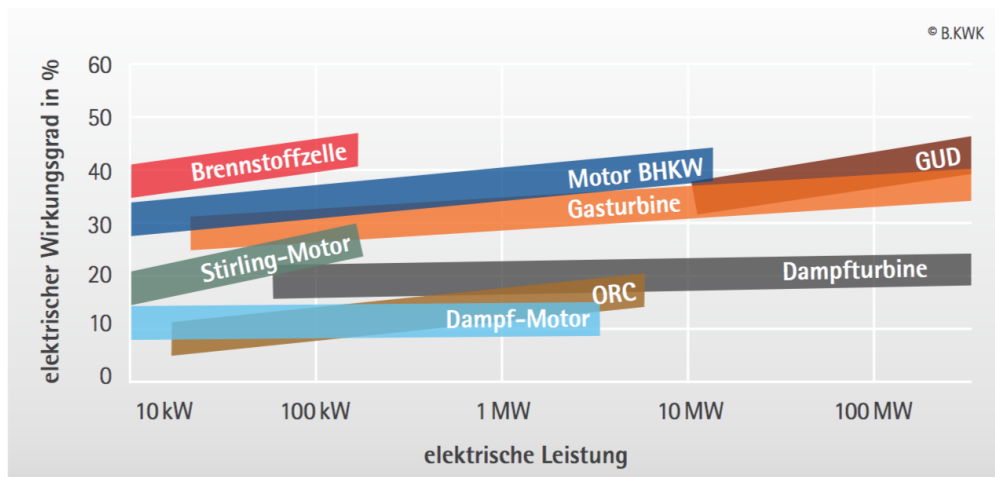


Bild 4.4: KWK-Technologien und ihre elektrischen Wirkungsgrade (bei industrietypischen Dampfenahmen und Gegendrücken) (Bundesverband KWK (2011))

Blockheizkraftwerke (BHKW) zur dezentralen Versorgung mit Strom und Wärme sind als Alternative zur Direktversorgung über einen Strom- und Wärmelieferanten insbesondere in Industrie und Gewerbe verbreitet. Meistens wird in Betrieben ohne hauseigenes BHKW der Strom vom Energieversorger bezogen, und die Wärme in Kesseln aus Erdgas, bei Vorhandensein auch aus Biogas oder Holzhackschnitzeln erzeugt. Die Motivation ein BHKW zu betreiben liegt zumeist dann vor, wenn der Stromverbrauch bei den Energiekosten besonders stark ins Gewicht fällt. Thermodynamisch macht es, wie bereits erläutert, Sinn, die Arbeitsfähigkeit der Verbrennungsgase zu nutzen.

Die nutzbare Wärme im KWK-Prozess setzt sich bei Motoren wie Turbinen aus der Nutzung der Abwärme aus dem Kühlwasser für die Kolben oder Turbinenschaufeln sowie dem Abgas aus der WKM zusammen. Das Temperaturniveau eignet sich bei den Abgasen zur Deckung von Prozesswärmebedarfen im Produktionsprozess, mit dem Kühlwasser können nur Heizbedarfe gedeckt werden.

Der Anteil der KWK-Eigenversorgung und der Fernwärmeversorgung am Wärmebedarf in verschiedenen Industriezweigen ist in Bild 4.5 dargestellt; die Brauereien gehören zum Zweig „Ernährung“, wobei dieser Bereich eine sehr allgemeine Zusammenfassung unterschiedlichster Prozesse darstellt; der Anteil an benötigter Wärme bei einer Temperatur oberhalb von 100°C beträgt etwa 40%. In einer Brauerei liegt das obere Temperaturniveau für das Wärmeaufnehmende Medium, einer Vorstufe des Bieres gerade um die 100°C bei Umgebungsdruck. Die Wärme, welche eingesetzt wird kann je nach Art der Wärmeübertragung zu einem Teil jedoch bis 160°C betragen (Kunze (2016)).

Wärmebedarf in der Industrie bis 500 °C

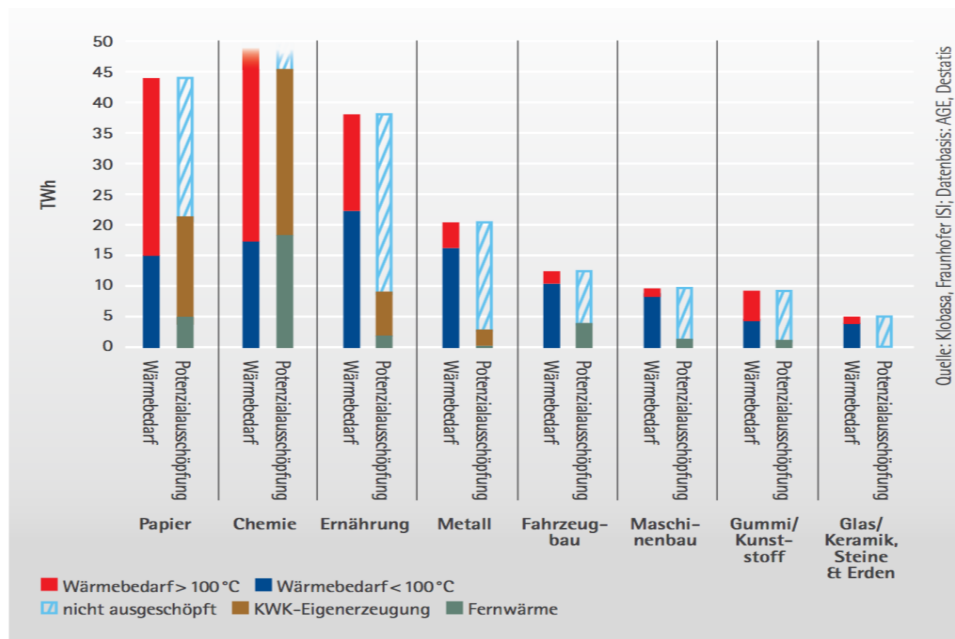


Bild 4.5: Stand 2010/11 des Anteils der KWK-Eigenversorgung und Fernwärme in verschiedenen Industriezweigen (Bundesverband KWK (2011))

Bei der Auskopplung von Wärme höherer Temperatur, wie z.B. im Abgaswärmetauscher eines Gasmotors, lässt sich Wärme für die meisten Prozesse erzeugen, zusätzlich ist es jedoch möglich, eine thermisch angetriebene Kältemaschine zur Raumklimatisierung oder für Kältekammern (Nutzkälte) anzutreiben. Diese zusätzliche Nutzung von Wärme, die in einem BHKW nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt wird, wird auch als Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) bezeichnet (s. Bild 4.6).

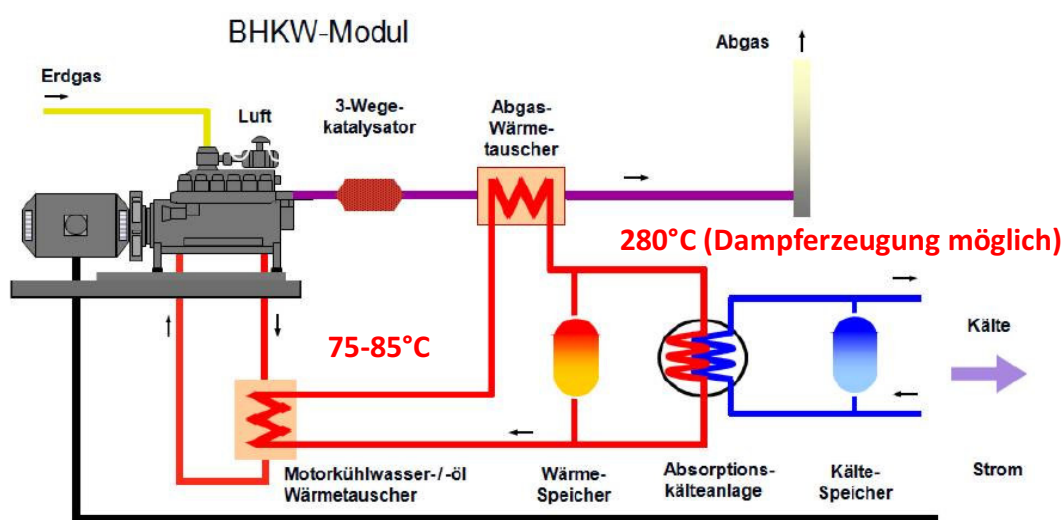


Bild 4.6: Gasmotor als BHKW Modul nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (mit Betrieb einer thermisch angetriebenen Absorptionskälteanlage) – typische Temperaturniveaus der ausgekoppelten Wärme im Abgas und Kühlwasser (Suttor (2014))

Generell gibt es zwei Betriebsweisen oder Auslegungsweisen für BHKW Anlagen; sie sind vom Bedarfsfall abhängig

Die meisten BHKWs sind meistens wärmegeführt, d.h. der Wärmebedarf ist die maßgebliche Auslegungsgröße. Der erzeugte Strom wird bei Überkapazität meist ins öffentliche Versorgungsnetz gespeist (besser ist Direktvermarktung). Damit läuft das BHKW nur, wenn Wärme nachgefragt wird und die Anlage ist auf einen hohen Nutzungsgrad hin optimiert.

Seltener ist eine stromgeführte Betriebsweise; das BHKW wird bei hohem Eigenverbrauch oder zur Direktvermarktung von Strom, sowie insbesondere auch zur Abdeckung teurer Spitzenlasten ausgelegt. Nicht unmittelbar nutzbare Wärme erfordert eine Wärmespeicherung, wenn Wärme nicht ungenutzt weggekühlt werden soll. Bei einer Gesamtbetrachtung überwiegen bei der Stromführung meist die Nachteile, insbesondere, wenn die Wärmenutzung gering ist; immerhin wird fast doppelt so viel Wärme im BHKW erzeugt, wie Strom.

Der Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. sieht in der KWK die effizienteste Art Primärenergie zu nutzen und empfiehlt die KWK zum nachhaltigen Wirtschaften in der Industrie (Bundesverband KWK (2011)). Es wird jedoch andererseits beim Thema KWK im Ernährungsgewerbe auch die Problematik gesehen, dass der Wärmenergiekostenanteil am Bruttoproduktionswert in Deutschland nur ca. 2% ausmacht. Für den Stromkostenanteil sieht dies jedoch mit ca. 15% ganz anders aus. Das Resümee lautet für den Bundesverband daher: Strom sparen hilft, Wärmesparen nicht unbedingt. Für die spezielle Anwendung in Brauereien muss dies jedoch so nicht gelten.

BHKW können auch netzgeführt, durch Fernsteuerung des BHKW von zentraler Stelle (Teil eines virtuellen Kraftwerks) betrieben werden. Ziel ist es dabei, Stunden- und Minutenreserven im Strommarkt bereitzustellen, z.B. zum Ausgleich kurzzeitiger Schwankungen aufgrund eines hohen Anteils wetterabhängiger erneuerbarer Energien. Eine wärmegeführte Anlage kann bei Bedarfsspitzen des Stroms dann auch ohne Wärmebedarf in Betrieb genommen werden; die Wärme muss entsprechend gespeichert oder weggekühlt werden. In dieser Betriebsweise ist eine hohe Stromausbeute des BHKW besonders wichtig.

Die Dimensionierung des BHKW hängt von der verbraucherabhängigen Bedarfsstruktur ab; der Auslegung entsprechend der Struktur des Wärmebedarfs oder entsprechend der Struktur des Strombedarfs. Dabei gelten als wirtschaftliche und energetische Kriterien, eine möglichst hohe Ausnutzung des BHKW im Nennlastbetrieb von mindestens 4500 Stunden (bei 8760 Std. im Jahr). Die Taktung (An- und Abschaltfrequenz) sollte möglichst gering sein, um einen frühzeitigen Verschleiß bzw. eine verringerte Lebenserwartung zu vermeiden.

In der Gesamtbetrachtung ist es wünschenswert eine höchst mögliche Ausnutzung der eingesetzten Brennstoffe zu erreichen. Das kann bedeuten, dass man auf die maximale Optimierung des elektrischen Wirkungsgrades verzichtet, wenn dadurch die Nutzbarmachung der Wärme erst ermöglicht wird, sofern es einen entsprechenden Wärmeabnehmer gibt. Entsprechend wird bei BHKW auf einen Jahresnutzungsgrad geschaut, ein über das Jahr integrierter Wirkungsgrad, der die über den Verlauf eines Jahres genutzte Wärme und den Strom ins Verhältnis zum eingesetzten Primärenergieträger setzt. Anfahrverluste und Teillastzeiten sind dabei enthalten.

In einer Formel ausgedrückt lautet dieser Gesamtnutzungsgrad

$$N = \frac{W_{t,el,n} + Q_{th,n}}{Q_B}$$

Optimal sind Werte von 85-90%, in manchen Anwendungen werden jedoch auch Werte von lediglich 50-60% erreicht.

Als Fazit lässt sich sagen, dass BHKW aus energietechnischer Sicht sinnvoll sind, wenn zur Erzeugung der geforderten Zielenergien, in der gesamten Umwandlungskette, der Primärenergieaufwand reduziert wird (vergleichbare Brennstoffe).

Energetische Bewertungen geben für den Investor allein noch keine Auswahlempfehlung; Investition, Betrieb, Rahmenbedingungen, Infrastruktur, Abnehmer sind zu berücksichtigen.

Eine übliche Methode, mit Hilfe einer grafischen Darstellung die Dimensionierung eines wärmegeführten BHKW abzuschätzen, ist es, die Wärmebedarfe für jeden Tag des Jahres zu bestimmen und die Bedarfe ihrer Größe nach, wie in Bild 4.7 dargestellt, zu einer sogenannten Jahresdauerlinie zu sortieren.

Die Dimensionierung eines (oder ggf. auch mehrerer) BHKW sollte den Richtwert für einen wirtschaftlichen Nennlastbetrieb von 4500 Stunden im Jahr berücksichtigen.

Mit Hilfe von Wärmespeichern kurzzeitigem Taktbetrieb oder Teillastbetrieb können ggf. nicht abgedeckte Bedarfe an Tagen mit geringem Wärmebedarf überbrückt werden. Spitzenlastkessel, die zusätzliche Wärme produzieren können, müssen die benötigte Restwärme an Tagen mit hohem Wärmebedarf decken.

Die Einbeziehung weiterer Wärmeverbraucher insbesondere im Sommer, z.B. durch thermische Kühlprozesse (KWKK) können zu einer deutlichen Verbesserung der ganzjährigen Auslastung eines BHKW führen, sowie eine Dimensionierung erlauben, die dann auch im Winter die Restwärmerzeugung im Kessel reduziert.

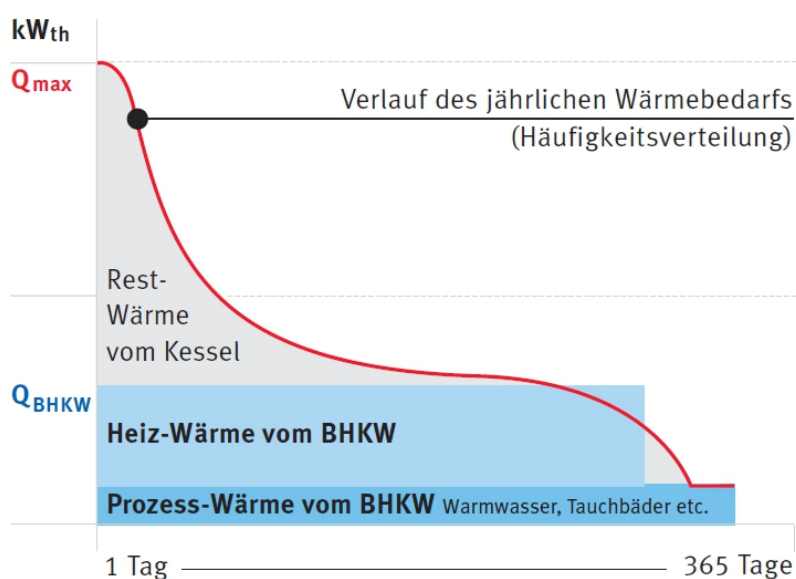


Bild 4.7: Jahresdauerlinie für die Dimensionierung eines wärmegeführten BHKW (Sokratherm)

4.2.3. Wärmepumpen

Was macht eine Wärmepumpe:

- Technische Anlage, die einen **Nutzwärmestrom \dot{Q}_{ab}** auf einem gewünschten Temperaturniveau T_{ab} abgeben kann,
- unter Nutzung eines **Wärmestroms \dot{Q}_{zu} auf tieferem Temperaturniveau T_{zu}** aus der Umwelt oder einem vorhandenen Wärmestrom, dessen Temperaturniveau für die gewünschte Verwendung nicht ausreicht,
- wobei **technische Arbeit W_t** , z.B. elektrische Energie, zum Antrieb der Anlage eingesetzt wird (es gibt auch thermisch angetriebene Ab- oder Adsorptionswärmepumpen)
- Anlage als **Kreisprozess eines Arbeitsfluids** ausgelegt.
- Prozess einer Kompressions-Wärmepumpe entspricht dem eines Kompressionskälteprozesses, nur wird anstatt der „Kälteseite“ die „Wärmeseite“ genutzt.

Was macht eine Wärmepumpe:

Sie ist im Prinzip eine Kältemaschine. Sie wird jedoch gewöhnlich auf einem höheren Temperaturniveau eingesetzt, um unter Ausnutzung eines Wärmestroms \dot{Q}_{zu} auf einem niedrigen Temperaturniveau T_{zu} , einen Nutzwärmestrom \dot{Q}_{ab} auf einem höheren Temperaturniveau T_{ab} zu erzeugen und abzugeben. Dazu braucht die Wärmepumpe Unterstützung durch technische Arbeit, also eine mechanische Antriebsleistung.

Die kühle Wärmequelle kann aus der Umwelt kommen oder von einem vorhandenen Wärmestrom, dessen Temperaturniveau für die gewünschte Verwendung nicht ausreicht.

Wärmequellen in der Praxis sind Grund- und Oberflächenwasser, Erdreich, Umgebungsluft oder auch warme Abluft oder Warmwasser aus Industrieprozessen.

4.2.4. Erneuerbare Wärmequellen

Als Erneuerbare Energieformen bieten sich ggf. der Betrieb von Biogasanlagen, Solarthermie und in seltenen Fällen Geothermie an.

Die meisten Industrieprozesse, bei denen Strom eingesetzt wird, aber auch Prozesswärme, müssen die Energie in Form von Abwärme meist wieder aus dem Produktionsprozess ausbringen. Die Abwärme liegt meist in Form warmer Luft oder warmem Wasser vor. Ähnlich wie die Wärme der Umwelt lässt sich diese Abwärme nicht direkt wieder nutzen. Hier kommen die den Kältemaschinen verwandten Wärmepumpen zum Einsatz, um die Wärme einer erneuten Verwendung im Produktionsprozess oder ggf. zu Heizzwecken zuzuführen. Dazu ist allerdings ein gewisser Aufwand an „edler“ Energie in Form von Strom erforderlich.

5 Wärme- und Kältebedarfe der Brauprozessschritte

Entlang des Brauprozesses haben wir in Kapitel 2 festgestellt, dass zunächst alle Prozessschritte vom Mälzen in der Mälzerei bis zum Kochen und Eindampfen der Würze in der Maischpfanne, einen Bedarf an Wärme haben. Die Nebenprozesse des Trocknen der Gerste vor der Lagerung, dem Darren des Malzes und dem Trocknen des Hopfens erfordern warme Luft, die im Wesentlichen Feuchtigkeit aus dem jeweiligen Gut aufnimmt, durch ihre Temperatur aber auch biologische Prozesse unterstützt. Der Brauprozess benötigt die Zufuhr von Wärme im Wesentlichen zum schrittweise erwärmen und schließlich zum Kochen und teilweise Verdampfen des Brauwassers, welches durch die jeweils in ihm gelösten Stoffe nacheinander als Maische (zu Beginn im Maischbottich), Vorderwürze (vor dem Abläutern), Pfannevoll-Würze (nach dem Abläutern und Anschwänzen) und Ausschlagwürze (nach dem Kochen und Verdampfen in der Pfanne) benannt wird. In guter Näherung kann zur Berechnung der Wärmebedarfe mit den Stoffeigenschaften des Wassers gerechnet werden, wenn die genauen Daten für die jeweilige Würze nicht bekannt sind. Die Prozesse und mit ihnen auch die Mengenverhältnisse von Wasser zu Malz, sowie die Menge des Wassers, welches beim Anschwänzen hinzugesetzt wird, wie auch die Menge des Brauwassers, das in der Maischpfanne gezielt verdampft wird, unterscheiden sich zwischen den einzelnen Brauereien teilweise recht stark. In guter Näherung lässt sich aber der Wärmebedarf der einzelnen Brauschritte recht gut berechnen.

Mit dem Prozessschritt des Gärens hat das Brauereiprodukt bis kurz vor dem Abfüllprozess einen stetigen Kältebedarf, mit Rasten mit zunehmend niedrigeren Temperaturstufen. In diesem Prozessabschnitt ändert sich die Zusammensetzung des Brauproduktes praktisch kaum mehr, so dass die berechneten Kältebedarfe durchaus allgemein für alle Brauereien gelten; lediglich die Anstelltemperatur des mit der Hefe gärenden Bieres unterscheidet sich für obergärige und untergärige Hefe, somit also auch der zeitliche Verlauf des Kühlbedarfs.

In der Literatur werden Bedarfswerte oftmals für mehrere Brauschritte zusammen angegeben, bzw. nur zwischen Sudhaus, Gär- und Lagerkeller und Abfüllung mit Vorbehandlung unterschieden. Dabei sagen die Bedarfswerte, wie auch die zunächst in dieser Arbeit berechneten Bedarfswerte, nichts darüber aus, in wie weit sie durch vorhandene Angebote an Wärme oder Kälte innerhalb des Prozesses abgedeckt werden können, oder in wie weit eine Energiezufuhr von außerhalb des Prozesses notwendig ist. In diesem Kapitel wollen wir zunächst auf die reinen Bedarfe eingehen. Bezüglich der Bereitstellung sollen hier zunächst nur die apparatetechnischen Möglichkeiten in der Praxis erwähnt werden.

Prozess Bedarf	1 Mälzen	2 Maischen	3 Abläutern	4a Hopfen	4b Kochen	5 Klären	6 Kühlen	7 Gären	8 Reifen	9 Abfüllen
Wärme	X	X	X	X	X					X
Temp.	85°C	78°C	78°C	50°C	103°C					80°C
Kälte						X	X	X	X	
Temp.						83°C	10°C	8°C	0°C	

Tabelle 5.1: Übersicht der Wärme- und Kältebedarfe entlang der Prozesskette in „qualitativer“ Weise; jeweils zu erreichende obere und untere Temperaturniveaus im Kühlgut (entspricht Tabelle 2.1).

5.2. Prozessschritte mit Wärmebedarf

5.1.1. Warmluft zum Trocknen der Gerste und Darren des Malzes

Um die Gerste zunächst für die Lagerung zu trocknen, kommen üblicherweise Warmluft-Körnertrockner zum Einsatz; der Trocknungsvorgang wird lt. Beschreibung und Abbildung bei Kunze (Kunze (2016)) im Kreuz-Gegenstrom geführt, mit einer Abkühlung der Malzkörner durch kühle Frischluft zum Ende des Prozesses. Die Lagertemperatur liegt bei unter 15°C.

Darrheizungen werden heutzutage noch mit Erdgas oder Öl befeuert und die Wärme über Rohrbündelwärmeübertrager an die Darrluft übertragen.

Der Wärmebedarf für das Darren wird mit ca. 750 kWh/t Fertigmalz unter Einsatz einer Wärmerückgewinnung aus der Abluft zugunsten der neu zugeführten Frischluft, und bis zu 1.100 kWh/t Fertigmalz ohne Wärmerückgewinnung angegeben. Kreuzstrom-Wärmeübertrager (KWÜ) aus Glasrohren (kostengünstig, säurebeständig, leicht zu reinigen) sind heute Standard zur Wärmerückgewinnung in Mälzereien. Darrprozesse unter Verwendung von früher üblichen Vertikaldarren als Trocknungsapparat haben wesentliche höhere Energieverbräuche von ca. 3.400 kWh/t Malz. Bei einem Verbrauch von ca. 17 kg Malz je Hektoliter Bier bedeutet das Darren ohne Wärmerückgewinnung, aber im modernen Glasrohrbündelwärmeübertrager einen Wärmebedarf von ca. 19 kWh je Hektoliter Bier, laut Kunze mit Wärmerückgewinnung 13 kWh je Hektoliter Bier.

Die Ventilatoren zum Belüften des Darrgutes sind große Stromverbraucher. Neben der Wärmerückgewinnung ist daher der Einsatz eines Blockheizkraftwerkes (BHKW) zur Ausnutzung des Primärenergieträgers Gas oder Öl für die Stromgewinnung bei weiterhin gleichzeitiger Bereitstellung von Wärme (ca. 60%) eine Möglichkeit, den Darrprozess energetisch günstiger zu gestalten.

Zur eigenen Berechnung des Energiebedarfs, der nur zum Erwärmen und Verdampfen des Wassers aus der Gerste notwendig ist, gehen wir von einem Ausgangszustand von 15% Wassergehalt aus, also 15% Gewichtsanteil von 17 kg Gerste je Hektoliter Bier – als grobem Anhaltswert. Wir nehmen an, dass dieser Wassergehalt bis auf 2% abnehmen wird. Daraus ergibt sich, dass Erwärmung und Verdampfungsenthalpie für ca. 2,5kg Wasser je Hektoliter aufzuwenden sind. Mit der Wärmekapazität $C_w = 4,2 \text{ kJ/kg K}$, einer Erwärmung von ca. 12 auf 100°C, sowie einer Verdampfungsenthalpie bei 100°C von 2.256 kJ/kg ergibt sich für die Wärmezufuhr je Hektoliter Bier:

$$Q_{\text{Malz}} = m \cdot (C_w \cdot \Delta T + \Delta h_v) = 2,5 \cdot (4,2 \cdot 88 + 2.256) \text{ kJ/kgK} = 6.564 \text{ kJ} = 1,8 \text{ kWh}.$$

Dieser Wert liegt fast eine 10er Potenz unter der im Prozess eingesetzten Wärmemenge. Das ist soweit plausible, da nur ein kleiner Teil der über die Gerste streichende Luft Wasser aus der Gerste verdunstet. Die angestellte Rechnung kann also nicht als Grundlage für den Wärmebedarf des Prozesses gelten, sondern Messungen aus realen Apparaten müssen herangezogen werden. Eine rechnerische Bestätigung des oben angegebenen Wärmebedarfs für das Darren erfordert die Anwendung von Grundgleichungen des Stofftransports aus der Verfahrenstechnik.

5.1.2. Erhitzen der Maische im Maischbottich

Der erste Prozessschritt des eigentlichen Brauprozesses hat, unabhängig von der Art der Zumischung des Brauwassers und der vollständigen oder teilweisen Erhitzung, einen bestimmten Wärmebedarf, um bestimmte Temperaturniveaus der Maische zu erreichen.

Kunze (Kunze (2016)) merkt jedoch an, dass das Dekoktionsverfahren gegenüber dem Infusionsverfahren höhere Wärmeverluste von 10 bis 20% aufgrund von Abstrahlung, Verdampfung und Pumpeneinsatz aufweist.

Verschiedene Einmaischverfahren werden sich auch energetisch in der Praxis zu einem gewissen Grade unterscheiden. Jedoch sind die Temperaturen, welche das ursprünglich kalte Frischwasser durchlaufen muss, letztlich ähnlich. Daher werden bei der nachfolgenden Betrachtung einer Vorgehensweise, wie sie vom Prinzip her durch das Dekoktionsverfahren realisiert wird, die zeitlichen Temperaturschritte und Rasten nach Bild 2.2 für das Infusionsverfahren verwandt.

Wärmebedarf zum Erwärmen der Maische

Seien $x_{zub,i}$ die jeweiligen Massenanteile an der flüssigen Gesamtmasse der geplanten Abmaische der unterschiedlich temperierten Frischwasserchargen mit den jeweiligen Temperaturen $t_{zub,i}$. Durch schrittweise Zumischung werden die verschiedenen Temperaturniveaus $t_{ma,i}$ in der Maische erreicht. Aus einer Wärmebilanz für die massenspezifischen Wärmemengen lässt sich folgende Beziehung aufstellen:

$$q_{Maische,i} = q_{Maische,i-1} + q_{zubrüh,i}$$

Vereinfachend wird die recht gut stimmende Annahme getroffen, dass die Wärmekapazität des Frischwassers und der Maische konstant bei $C_{W,i} = 4,2 \text{ kJ/kg K}$ liegt.

Damit ergibt sich für die Berechnung der Mengenanteile:

$$x_{zub,i} = \frac{m_{zub,i}}{m_{Abmaische}} = x_{ma,i-1} \cdot \frac{(t_{ma,i} - t_{ma,i-1})}{(t_{zub,i} - t_{ma,i})}$$

Mit dem Gesamtanteil der Maische nach dem letzten Zubrühren von $x_{ma,n} = 1$, lassen sich die Werte zuzuführenden Frischwassermengen, unter Berücksichtigung der jeweiligen Temperaturen, berechnen.

Beispiel (s. Tabelle 5.2):

100 hl Wasser in der Maische beim Abmaischen geplant.

1. 450 l Frischwasser bei 10°C mit 1.780 l Zubrühwasser bei 60°C ergeben 2.230 l Wasser in der Einmaische bei 50°C.
2. Weitere 2.060 l Zubrühwasser bei 75°C ergeben 4.290 l Maische in Rast 1 bei 62°C.
3. Weitere 2.380 l Zubrühwasser bei 90°C ergeben 6.670 l Maische in Rast 2 bei 72°C.
4. Letzte Zugabe von 3.330 l Wasser bei 90°C ergeben 10.000 l Maische bei 78°C.

	Index i	t zu (°C)	t ma (°C)	X zu	X ma	X zu	X ma
Frischwasser	0		10		0,200 * X ma1		0,045
Einmischung	1	60	50	0,800 * X ma1	1,000 * X ma 1	0,178	0,223
Rast 1	2	75	62	0,923 * X ma1	1,923 * X ma1	0,206	0,429
Rast 2	3	90	72	1,068 * X ma1	2,991 * X ma1	0,238	0,667
Abmaischen	4	90	78	1,496 * X ma1	4,487 * X ma1	0,333	1,000
					= X ma4 = 1		

Tabelle 5.2: Beispielrechnung für die Berechnung „Zubüh“-Mengen beim Dekoktionsverfahren als Funktion der Zubüh- und Rast-Temperaturen.

Das Maischwasser ist gänzlich aus frischen Brunnenwasser bei der Temperatur von 10°C durch Zubrühren entstanden. Unter Vernachlässigung der Wärmeverluste im Würzekühler, den Transportrohren, dem Zwischenspeicher sowie bei der Materialerwärmung des Maischbottichs und Wärmeverlusten über die Bottichwand, sind den 100 hl Frischwasser folgende Wärmemenge zugeführt worden:

$$Q_{zu} = m_W \cdot c_W (t_{ma,4} - t_{ma,0})$$

$$= 10.000 \text{ l} \cdot 0,99 \text{ (kg/l)} \cdot 4,19 \text{ (kJ/(kg K))} \cdot (78 - 10) \text{ K} = 2.820 \text{ MJ} = 784 \text{ kWh},$$

je Hektoliter Maische vor dem Prozessschritt des Läuterns also 7,84 kWh. Durch Anschwänzen beim Abläutern (Kapitel 2.3.) wird die ursprüngliche Maische um ca. 130% gestreckt, sowie bei Kochen in der Pfanne um ca. 4-6% eingedampft. Damit ergibt sich das Verhältnis von Biermenge zu Maischwasser von ca. 2,20. Somit entspricht die zugeführte Wärmemenge je Hektoliter Verkaufsbier 3,56 kWh.

Berücksichtigung der Wärmeaufnahme durch das Gefäßmaterial

Die näherungsweise Berücksichtigung der Wärmekapazität des Maischbottichs erfordert ein paar vereinfachenden Annahmen:

Der Bottich ist zylinderförmig und hat das 1,5-fache Volumen der gesamten Maische; bei 100 hl also 150 hl. Sei die Höhe $h = 2r$, des Radius der Zylinderbodenfläche.

Das Bottichvolumen ergibt sich zu $V = \pi r^2 \cdot 2r = 150 \text{ hl}$, die Deckel- und die Bodenfläche zusammen zu $A_K = 2\pi r^2$, sowie die Zylinderwandfläche zu $A_Z = 2\pi r \cdot 2r$. Der Bodenradius lässt sich aus dem Volumen zu $r = 1,336 \text{ m}$ bestimmen.

Mit einer Wandstärke $d_M = 3 \text{ bis } 6 \text{ mm}$ für den Maischbottich errechnet sich das Volumen des Bottichmaterials zu $V_M = (A_K + A_Z) \cdot d_M = 0,10 \text{ bis } 0,20 \text{ m}^3$.

Für Wandmaterial aus Cr-Ni-Stahl mit Wärmekapazität $C = 0,502 \text{ kJ/kg K}$ und Dichte $\rho = 7.800 \text{ kg/m}^3$ oder Kupfer mit $C = 0,382 \text{ kJ/kg K}$ und $\rho = 8.930 \text{ kg/m}^3$ (Q: Seidel) ergibt sich für den Wärmebedarf zur Erwärmung der Maischbottichwand mit

$$Q_{zu,M} = \rho \cdot V_M \cdot C (t_{ma,4} - t_{ma,0}),$$

7,4 bis 14,8 kWh für Cr-Ni-Stahl und 6,4 bis 12,9 kWh für Kupfer; Beide Materialien führen zu näherungsweise ähnlichen Wärmebedarfen für die Materialaufwärmung.

Je Hektoliter Maische ergibt sich für diese recht typische Größe eines Maischbottichs von 150 hl ein Wärmearaufwand von Näherungsweise 0,07 bis 0,14 kWh, und je Hektoliter Verkaufsbier 0,03 bis 0,06 kWh. Damit liegt der Wärmearaufwand für den Bottich bei lediglich 1-2% des Wärmebedarfs für die Maische. In zukünftigen Rechnungen größerer mit Biervorprodukten befüllter Bottiche und Pfannen sowie auch der Verbindungsleitungen und Armaturen, wird daher auf die Berechnung des Wärmebedarfs dieser Materialien verzichtet.

Berücksichtigung möglicher Wärmeverluste an die Umgebung

Im Rahmen der Anfertigung einer Habilitationsschrift von Krottenthaler (Krottenthaler (2007)) wurde festgestellt, dass die Dauer der Rasten bei verschiedenen Temperaturen während des Maischvorgangs einen kaum wahrnehmbaren Einfluss auf den Energiebedarf während des Maischens haben.

Für den Aufwärmvorgang im Maischbottich soll ein leicht vereinfachter zeitlicher Verlauf aus Bild 2.2 b angenommen werden, bei dem die Temperaturniveaus in Maische und Bottichmaterial jeweils sprungartig erreicht und eine entsprechende Zeit über gehalten werden. Die Außentemperatur der nicht-isolierten Bottichwand soll sich dabei umgehend der Temperatur der Maische anpassen. Die oben gemachten Annahmen sind für eine näherungsweise Betrachtung hinreichend realitätsnah; instationäre Wärmedurchgänge brauchen nicht berücksichtigt werden.

Für den nicht-isolierten zylindrischen (Stahl-)bottich wird ein Wärmedurchgangskoeffizient (inklusive Strahlung) von $k_V = 45 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ angenommen (www.systemdesign.ch). Die Umgebungstemperatur des Gebäudes sei 18°C. Wärme wird über die Zylinderwand und den Deckel, nicht jedoch den Boden abgegeben; $A_V = 4\pi r^2 + \pi r^2 = 28,0 \text{ m}^2$, und damit ein Wärmeleitwert von $k_V \cdot A_V = 1.260 \text{ W/K}$.

	Dauer (min)	Temp.-Niv. (°C)	Temp.-Diff. (K)	$K_V \cdot A_V$ (W/K)	Q_V (kW)	Q_V (kWh)
Umgebung	120	18				
Einmaischung	45	50	32	1.260	40,3	30,2
Rast 1	40	62	44	1.260	55,4	37,0
Rast 2	20	72	54	1.260	68,0	22,7
Abmaischen	15	78	60	1.260	75,6	18,9
						108,8

Tabelle 5.3: Beispielrechnung für die konstanten Wärmeverlustströme \dot{Q}_V und die auf jeweiligem Temperaturniveau stattfindenden Wärmeverluste Q_V .

Mit der Berechnung für die, auf den jeweiligen Temperaturniveaus konstanten Wärmeverlustströme $\dot{Q}_V = k_V \cdot A_V \cdot (t_{\text{Bottich}} - t_{\text{Umgebung}})$ und den mit den Rastauern daraus resultierenden Wärmeverlusten $Q_V = \dot{Q}_V \cdot \Delta\tau$, erhält man einen Gesamtwärmeverlust von ca. 109 kWh.

Mit 100 hl Maische macht der Wärmeverlust über die nicht-isolierte Bottichwand, je Hektoliter Maische ca. 1,1 kWh, und je Hektoliter Verkaufsbier ca. 0,5 kWh aus.

Bei dieser Rechnung ist der Wärmedurchgangskoeffizient ein relativ großer Unsicherheitsfaktor. Ohne Isolierung erhält man, mit diesem Wert für den Wärmedurchgangskoeffizienten, einen Wärmeverlust der bei ca. 15% der Wärmemenge für die Erwärmung der Maische liegt. Er sollte jedoch eher deutlich kleiner sein, wenn man eine Isolierung der Bottiche, Kessel und Rohre vornimmt.

	GASE Pr ≈ 1	FLÜSSIGKEITEN Pr ≈ 10
natürliche Konvektion	$3 < \alpha^* < 20$	$100 < \alpha^* < 600$
erzwungene Konvektion	$10 < \alpha^* < 100$	$500 < \alpha^* < 10\,000$
Phasenwechsel	$1000 < \alpha^* < 10\,000$ Kondensation	$1000 < \alpha^* < 100\,000$ Verdampfung
Typische Zahlenwerte des Wärmeübergangskoeffizienten α^* Jeweils in W/m²K		

Tabelle 5.4: Bereiche für Wärmeübergangskoeffizienten anwendbar auf das Gas Luft und die Flüssigkeit wässrige Lösungen (Herwig (2000))

Zur Überprüfung der Plausibilität, des aus einer Übungsaufgabe der Internetseite System-Physik (www.Systemdesign.ch) übernommenen Wärmedurchgangskoeffizienten, wird hier kurz eine Betrachtung der Haupteinflussgröße vorgenommen.

Der Durchgangskoeffizient k berechnet sich wie folgt aus der „Reihenschaltung“ der Wärmewiderstände beim Wärmeübergang (Seidel (2017)), von der flüssigen Maische im Bottich an die Innenwand; $(1/\alpha_{Fl-innen})$, durch die Bottichwand mit der Wandstärke $d = 5\text{ mm}$; (d/λ_{Wand}) , und von der Wand an die Umgebungsluft; $(1/\alpha_{Gas-außen})$:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_{Fl-innen}} + \frac{d}{\lambda_{Wand}} + \frac{1}{\alpha_{Gas-außen}}$$

Die Wärmeübergangskoeffizienten α haben, wie der Durchgangskoeffizient die Einheit W/m²K, die Wärmeleitfähigkeit der Wand λ_{Wand} hat die Einheit W/mK.

Unter der Annahme einer gut gerührten Maische (erzwungene Konvektion) im Bottich mit $\alpha_{Fl-innen} \sim 2.000\text{ W/m}^2\text{K}$, einem gut wärmeleitenden Kupferkessel mit $\lambda_{Wand} = 380\text{ W/m K}$, und einer Halle mit leichter Luftbewegung (zwischen natürlicher und erzwungener Konvektion) mit $\alpha_{Gas-außen} \sim 20\text{ W/m}^2\text{K}$, ergibt sich ein Wert von $k = 19,8\text{ W/m}^2\text{K}$.

Dominierender Faktor ist dabei der größte Wärmewiderstand beim Übergang der Wärme an die Luft. Für einen Stahlbottich mit $\lambda_{Wand} = 15\text{ W/m K}$ ergibt sich nahezu derselbe Wert mit $k = 19,6\text{ W/m}^2\text{K}$.

Wärmeverlust durch Strahlung

Untersuchungen an großtechnischen Modellen, bei denen die Gefäße des Maischprozesses mit Steinwolle gedämmt waren, ergaben einen rechnerischen Verlust durch Abstrahlung während des gesamten Maischprozesses von lediglich 0,3%. Unabhängig vom Maischverfahren und der Art des Bieres werden 99,6% des Energiebedarfs für das Aufheizen bis zur Abmaischtemperatur /üblich 76-78°C) aufgewendet (Krottenthaler (2007)).

Berechnung der Abstrahlung bei einem möglicherweise nicht isolierten Maischbottich: Der Strahlungsanteil bei den Wärmeverlusten lässt sich näherungsweise nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz für die den Strahlungsaustausch zwischen einem schwarzen Strahler mit der Oberflächentemperatur $T_{W,s}$ und der Umgebung, im Falle des Maischbottichs die umgebenden Wände des Hallengebäudes, mit der Temperatur $T_{U,s}$ berechnen. Der schwarze Strahler ist ein idealisierter Körper, der auf ihn treffende Strahlung vollständig absorbiert und bei seiner Oberflächentemperatur seinerseits die maximal mögliche thermische Leistung aussendet.

Die Netto-Strahlungsleistung I_W der Bottichwand berechnet sich unter Verwendung der Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$ zu

$$I_W = \sigma \cdot A_V (T_W^4 - T_U^4) .$$

	Dauer (min)	Temp.-Niv. (°C)	Temp.-Niv. (K)	Av (m 2)	I wand (kW)	Qs (kWh)
Umgebung	120	18	291			
Einmaischung	45	50	323	28,0	5,9	4,4
Rast 1	40	62	335	28,0	8,6	5,7
Rast 2	20	72	345	28,0	11,1	3,7
Abmaischen	15	78	351	28,0	12,7	3,2
						17,0

Tabelle 5.5: Beispielrechnung für die Strahlungsverlustströme I_W und Wärmeverluste durch Strahlung Q_S auf dem jeweiligen Temperaturniveau.

Aus den näherungsweise bestimmten konvektiven Wärmeverlusten (ca. 109 kWh) und den Verlusten durch Wärmestrahlung nach der Berechnung in Tabelle 5.5 (17 kWh), müsste der berechnete Wärmedurchgangskoeffizient für die konvektiven Wärmeverluste noch um ca. 16% auf ca. 23 W/m²K erhöht werden. Die Strahlung ist bei den moderaten Temperaturen nur von geringem Einfluss.

Damit ist der vorher angenommene Wert für den Wärmedurchgangskoeffizienten, inklusive einer Berücksichtigung der Wärmeabstrahlung, mit $k = 45 \text{ W/m}^2\text{K}$ plausibel und charakterisiert gleichzeitig eher eine obere Grenze für die Wärmeverluste.

5.1.3. „Abläutern“ Erhitzen des Anschwänzwassers

In Kapitel 2.3. hatten wir gesehen, dass die Nachgüsse (Anschwänzen) das zusätzliche Erhitzen von Frischwasser von ca. 130% der Maischwassermenge erfordern.

Demnach ergibt sich für den zusätzlichen Wärmebedarf bei einer Temperatur von 78°C beim Anschwänzen, mit der allgemeinen Formel, die wir auch schon für die Erwärmung der Maische benutzt haben:

$$\begin{aligned} Q_{zu} &= m_W \cdot c_W (t_{Nachg} - t_{Fr,0}) \\ &= 130 \text{ l} \cdot 0,99 \text{ (kg/l)} \cdot 4,19 \text{ (kJ/(kg K))} \cdot (78 - 10) \text{ K} = 36,7 \text{ MJ} = 10,2 \text{ kWh} \end{aligned}$$

je Hektoliter Maische, bzw. 4,6 kWh je Hektoliter Verkaufsbier.

Der Bedarf für die Erwärmung der Läuterbottichwand sowie den Wärmeverlust, über einen möglicherweise nicht isolierten Läuterbottich, kann entsprechend der Berechnungen für den Maischbottich mit ca. 0,5 kWh je Hektoliter abgeschätzt werden.

5.1.4. Aufkochen und Eindampfen der Würze in der Würzepfanne

Für die Erwärmung der Würze von ca. 75°C nach dem Läuterbottich auf 100°C beim Sieden benötigt man entsprechend der Gleichung

$$Q_{zu,K} = \rho_{Wü} \cdot V_{Wü} \cdot c_{Wü} \Delta T = 0,99 \text{ kg/l} \cdot 105 \text{ l} \cdot 4,2 \text{ kJ/kg K} \cdot 25 \text{ K} = 3,04 \text{ kWh}$$

je Hektoliter Ausschlagwürze, was näherungsweise auch einem Hektoliter Verkaufsbier entspricht.

Umgerechnet auf die Menge des Verkaufsbiers wird bei Kunze (Q: Kunze) ein Wert von 3,6-3,8 kWh je hl angegeben; bei einer Anhebung der Extraktkonzentration von 1,5% zwischen Pfannevoll-Würze (10%) und Stammwürze (11,5%) entspricht dies (Entfernung fester Restbestandteile im Whirlpool und Filter nicht berücksichtigt) einer Volumenreduzierung von ca. 14%. Aus den berechneten 3,04 kWh werden somit ca. 3,35 kWh je hl Verkaufsbier (berechnet).

Für die Verdampfung von 4-6% des Wassers aus der Pfannevoll-Würze wird folgende Wärmemenge benötigt:

$$Q_{zu,V} = \rho_{Wü} \cdot V_{Wü} \cdot \Delta h_{s,W}$$

mit der Verdampfungsenthalpie von Wasser $\Delta h_{s,W} = 2.257 \text{ kJ/kg}$, einer Dichte der Würze von zwischen 96 kg/hl (Pfannevoll-Würze) und 101 kg/hl (Ausschlagwürze) und einem Volumen von 4-6 Litern.

Damit ist $Q_{zu,V} \approx 2,5\text{-}3,7 \text{ kWh}$ je hl Pfannevoll-Würze, oder 2,6-3,9 kWh je hl Verkaufsbier.

5.1.5. Leichtes Abkühlen vor dem Whirlpool oder Strippen der Würze vor der Kühlung

Geht man von der Siedetemperatur in der Würzepfanne von ca. 100°C aus, so liefert die Abkühlung der Würze vor dem Whirlpool eine nutzbare Wärme im Temperaturbereich zwischen 100 und 85°C; dies ergibt je Hektoliter Bier 1,75 kWh.

Die alternative des Strippens der Würze nach dem Whirlpool erhält die Siedetemperatur in der Würze und erlaubt es im Würzekühler diese Wärmemenge, zu einem günstigeren Zeitpunkt anzubieten.

5.2. Prozessschritte mit Kühlbedarf

Entsprechend der Kältebedarfeinteilung in Kapitel 2.2.

- a) Raumkühlung für Menschen,
- b) Kühlung von technischen Prozessen, sowohl aufgrund der Dissipation von technischer Arbeit sowie aufgrund chemischer oder biologischer Umwandlungsprozesse,
- c) Kühlung von Lebensmitteln und anderen temperaturempfindlichen Produkten zur Haltbarmachung und Lagerung,

gilt für den Brauprozess folgendes:

- a) Die Räumlichkeiten in Brauereien für die Prozessschritte des Maischens sowie für die Gärung der gekühlten Würze und der nachfolgenden Lagerung müssen von der Temperatur und der Luftqualität her für die im Brauprozess beschäftigten Menschen begehbar sein. Gekühlt wird in den Räumen der Würzegärung und der Lagerung des Jungbieres allerdings aus Erfordernissen des Prozesses (s. Abschnitt c.). Da Frischluft in die Räume eingebracht werden muss und gekühlte Luft dafür abgesaugt werden muss, ist der Kühlbedarf höher, als wenn die Temperatur im Kühlraum nur gehalten werden müsste. Die in Kapitel 3.3. unter Austausch der Raumluft aufgeführte Last ist also im Bereich der Gärung mit offenen Tanks nicht unerheblich.
- b) In Brauereien kommen Motoren für Rührwerke in den Behältern für die Maische in den ersten 4 großen Brauphasen zum Einsatz; in der Maischpfanne, dem Läuterbottich, der Würzepfanne und dem Whirlpool. Zur Förderung der Maische und später Würze zwischen diesen Behältern werden Pumpen eingesetzt, deren Antriebe nur kurzzeitig laufen, dann aber eine gewisse Kühlung erfahren müssen. Diese genannten Antriebe haben meist eine Luftkühlung über Rippenkühler. Ihr Energieeintrag ist jedoch eher klein; das Rühren findet recht langsam statt, das Pumpen nur für relativ kurze Zeit. Die Antriebe für die Kompressoren der Kühlanlagen, zum Kühlen der gärenden Würze und des lagernden Jungbieres, gehört ebenfalls in diese Kategorie; wie bei allen Elektromotoren werden die Verluste, bei der Umwandlung von Strom in mechanische Energie, über die Außenfläche des Motors, meist über Rippen, abgeführt. Des Weiteren gibt es Antriebe mit geringem Kühlungsbedarf in der Anlage zur Reinigung der Flaschen und bei der Abfüllung.

Der Abtransport der Wärme, der beim Gärprozess mit der Hefe entsteht, gehört in diese Kategorie.

- c) In die Kategorie Lebensmittelkühlung fällt der große Kühlaufwand der zuvor gekochten Bierwürze sowie der weiter zu kühlenden, gärenden Würze und später des lagernden Jungbieres. Dabei muss sowohl der zur Kühlung der großen Mengen an wässrigen Lösungen benötigte Kühlmengenstrom \dot{Q}_o , wie auch die Antriebsleistung der Kältemaschine (Kompressor bei der Kompressionskältemaschine) P als Wärme über den Kondensator (-Wärmeübertrager) der Kälteanlage abgeführt werden (s. Bild 3.3 und Bild 3.5). Die Kühlung findet in den Gärtanks für das Gären unter Zugabe von Hefe (4-9°C für untergärrige Hefe und 15-20°C bei obergärriger Hefe), sowie in den Räumen zur Unterbringung der großen, geschlossenen Lagertanks für die Reifung (bei 0-1°C) des „Jungbiers“ statt.

Im Brauprozess treten die in Kapitel 3.3 angesprochenen äußeren Lasten durch Transmissionswärme insbesondere über die Oberflächen der Gär- und Lagertanks auf. Eine wünschenswerte Isolation kann entweder direkt an der äußeren Oberfläche der Tanks angebracht werden, wobei zumindest bei den offenen Gärtanks diese Isolation an der Öffnungsstelle unterbrochen wäre und zudem ein direkter Kontakt zwischen gekühlter Würze und warmer Umgebungsluft bestünde. Die andere, gängige Möglichkeit ist es die Tanks in einem leicht von Wärmeeinflüssen zu isolierenden Raum aufzustellen, z.B. in einem kühlen, tiefgelegenen Kellerraum eines Brauereigebäudes. In diesem Fall wird der gut isolierte Kellerraum, der von einem über das Jahr gleichbleibend kühlen Erdreich (in Deutschland ca. 9-12 °C im Jahresgang bei 6m Tiefe, s. Bild 5.1 a/b) umgeben ist, ebenfalls auf der Lagertemperatur gehalten. Die bereits angesprochenen Lasten durch notwendige Luftwechsel sowie Türöffnungsverluste durch das Betreten des Kühlraumes (letztere lassen sich recht gut minimieren) bleiben jedoch bestehen.

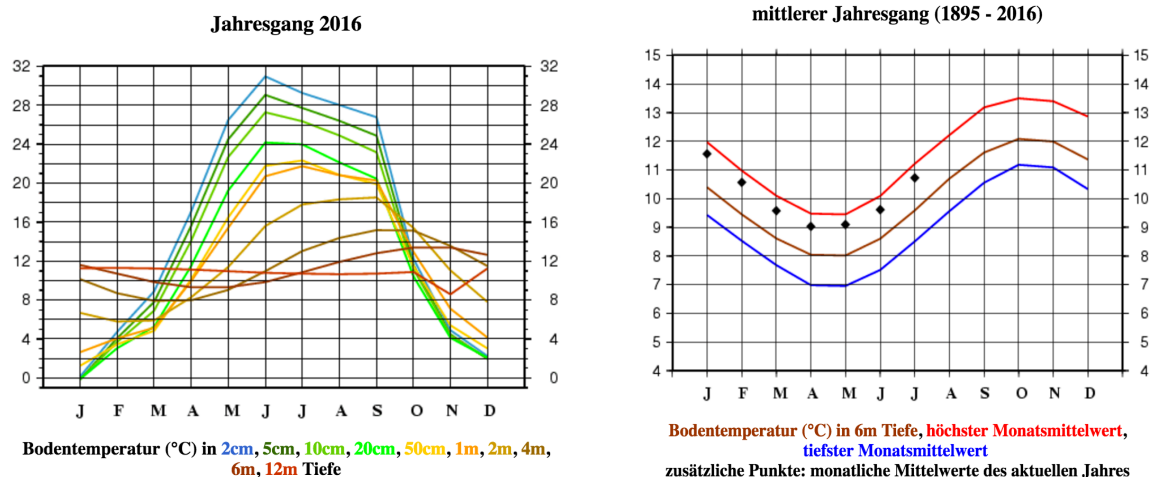


Bild 5.1 a/b: Bodentemperaturen in Potsdam (PIK)

In den „wärmeempfindlichen“ Bereichen der Brauerei, also im Wesentlichen in den kühlen Lagerräumen der Gär- und Lagerkessel, werden die in Kapitel 3.3 angesprochenen inneren Lastanteile im Wesentlichen nur von der nach Austritt aus dem Whirlpool in den Würzekühler stark abzukühlenden Würze und dem für die Lagerung noch leicht herunter zu kühlenden Jungbier gebildet. Hinzu kommt die Abkühlung des Tankmaterials (Kupfer oder V2A-Stahl), wenn man keine Isolation des Tanks an seiner Innenseite vornehmen will. Das im Vergleich zur Würze bzw. zum

Jungbier (Tankvolumen) vergleichsweise geringe Volumen des Tankmaterials, bei einer jeweils etwas kleineren auf das Volumen bezogenen Wärmekapazität von V2A-Stahl und Kupfer gegenüber Wasser, rechtfertigt den Aufwand einer inneren Isolierung der Tanks eher nicht; der zusätzliche Kühlaufwand liegt in der Größenordnung von 2-4% (Beispielrechnung Heidemann (2016)).

Bei den offenen Gärtanks kann es zu Kühllasten durch gekühlte entweichende Gase kommen, wobei diese, bei gekühlten Aufstellräumen für die Tanks, erst durch den Luftwechsel zu einer Last werden. Die durch Ventilatorbetrieb im Kühlraum dissipierte Leistung, welche der Versorgungsleistung (Strom) abzüglich der Motorverluste (ca. 5% der Versorgungsleistung) entspricht, lässt sich, wie auch die Leistung für eine mögliche Verdampferabtauheizung, nicht verhindern. Die Last durch Gebläsemotorverluste (nur 5% der Versorgungsleistung) ließe sich durch auswärtige Installation des Motors vermeiden, ist aber meist nicht praktikabel.

Nicht eingegangen wird hier auf den Kühlungsbedarf für Raumluftkühlung in verschiedenen Gebäudeteilen, die nicht zu den Kühlräumen zählen.

5.2.1. Kühlen im Würzekühler

Der Würzekühler ist zumeist ein Plattenwärmeübertrager, der mit der Würze und Eiswasser als Kühlmittel im Gegenstrom betrieben wird. Die Platten bestehen heutzutage fast ausschließlich aus Chrom-Nickel-Stahl, der zwar vom Material her keine besonders gute Wärmeleitfähigkeit aufweist, dafür aber eine hohe mechanische Stabilität, Korrosionsbeständigkeit und ein gutes Reinigungsverhalten im CIP (Cleaning in Process) - Verfahren (Kunze (2016)). Die geringere Wärmeleitfähigkeit des Stahls im Vergleich zu Kupfer z.B. wirkt sich jedoch aufgrund der relativ geringen Wandstärke der mechanisch stabilen Platten und der deutlich nachteiligeren Wärmeübergangskoeffizienten sowohl von der Würze an die Plattenoberfläche wie auch von der Plattenoberfläche an das Kühlwasser, nicht bestimmend für den Wärmedurchgang aus.

In kleineren Brauereien und insbesondere im Hobbybereich haben sich Eintauch-Würzekühler aus Edelstahl bewährt. Dabei handelt es sich um eine mit Kühlwasser versorgte Rohrspirale, welche innerhalb des Whirlpools oder sogar der Würzepfanne (mit Whirlpoolfunktion) in die Würze getaucht wird.

Die Berechnung des Kühlbedarfs entspricht der Wärmemenge, die dem Kühlgut entzogen werden muss, um bei bekannter Wärmekapazität die Temperaturabsenkung von ca. 85°C auf 15°C beim obergärigen Bier zu vollziehen:

$$Q_{ab,K} = \rho_{W\ddot{u}} \cdot V_{W\ddot{u}} \cdot C_{W\ddot{u}} \Delta T = 0.99 \text{ kg/l } 100 \text{ l } 4,2 \text{ kJ/kg K } 70 \text{ K} = 8,1 \text{ kWh}$$

je Hektoliter Bier.

5.2.2. Kühlhalten im offenen Gärtank, mit Luftwechsel und Frischluftkühlung

Die Kühlleistung dient bei der Gärung im offenen Gärtank zum einen der Abfuhr der aus der Umgebung zugeführten Wärme, wie auch der im Gärprozess von der Hefe erzeugten Wärme.

Insbesondere offene Gärtanks werden meist in gekühlten Gäräumen untergebracht, die möglichst isoliert von der äußeren Umgebung, ohne viel Kälteleistung eine über das Jahr konstante Temperatur halten können. Entsprechend der Nord- und Mitteleuropäischen Jahresdurchschnittstemperatur von ca. 10°C (s. Bild 2.3) eignen sich Kellerräume.

Für obergärig gärende Biere mit einer Gärtemperatur von 15 bis 18°C müsste demnach die Temperatur im Gärbottich bereits ohne weitere Kühlung erhalten werden können. Ein Luftaustausch ist jedoch notwendig, um insbesondere die durch CO₂ Bildung gefährdete Luftqualität zu gewährleisten. Potentiell ist der Kellerraum für obergäriges Bier von Natur aus kühler als die Gärtemperatur, so dass mit der Abgabe von Wärme aus dem Gärbottich, die Erwärmung der gärenden Würze durch die metabolischen Vorgänge der Hefe in die Raumluft abgeführt werden. Eine möglicherweise doch nötige Beförderung der Wärme durch unterstützende Kühlung bei Temperaturen um 15°C verringert die Kühlleistung, die zum Luftaustausch während des Sommerhalbjahres benötigt wird.

Abschätzung des Kühlungsaufwandes für den Luftaustausch im Sommerhalbjahr

Annahme: Je Hektoliter Würze beinhaltet der Gärkeller 3 Hektoliter Raumluft, die mit einer Luftwechselrate von 2mal pro Stunde durch Frischluft der Durchschnittstemperatur von 20°C ersetzt werden soll.

Der Kühlbedarf bei Abkühlung der Frischluft auf Kellertemperatur von 10°C, mit den temperaturabhängigen Werten für die Dichte und die Wärmekapazität für trockene Luft bei 20°C, ergibt je Hektoliter Bier bei einer Aufenthaltsdauer im Gärkeller von 3 Tagen (Luftwechselrate 2-mal pro Stunde):

$$Q_{ab,K} = 3 \cdot 24 \cdot 2 \cdot \rho_L \cdot V_L \cdot C_{P,L} \Delta T = 144 \times 1,204 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,3 \text{ m}^3 \cdot 1,005 \text{ kJ/kg K} \cdot 10 \text{ K} = 0,15 \text{ kWh}$$

Eine Kälterückgewinnung ist dabei nicht berücksichtigt.

Annahme: Es gibt in der Brauerei täglich 5 Würzeansätze von je 100 Hektolitern. Damit muss der Gärkeller Raum für 5 Ansätze x 3 Tage x 220 hl gärende Würze, gleich 3.300 hl Würze bieten. Nach der oben gemachten Annahme enthält der Keller somit knapp 1.000 m³ Raumluft, und die Luftwechselrate erfordert einen Luftaustausch von 2.000 m³/h.

Die Wärmelast in der Zuluft aufgrund des Ventilators kann beispielhaft mit einem Ventilator der Firma Dassler (www.Dasslerventilatoren.info) abgeschätzt werden:

Zur Anwendung kommen kann ein Axial Wandventilator - Abluftventilator (Type DHC25-2T/H) mit 120 W Antriebsleistung und maximaler Fördermenge Luft von 2200 m³/h. Bei 3 Tagen Dauerbetrieb wird einer Antriebsenergie von 8,7 kWh benötigt. Diese 8,7 kWh Antriebsleistung gelangt praktisch vollständig als Wärmelast in die Zuluft, und verteilt sich auf den Hektoliter Bier mit 8,7/3.300 = 0,0026 kWh.

5.2.3. Abkühlung des Jungbiers im geschlossenen Lagertank

Die Lagertemperatur von 0 bis 1°C erfordert eine weitere Abkühlung des obergärigen Bieres von 15 bis 18°C. Der Kühlbedarf liegt somit bei

$$Q_{ab,K} = \rho_{W\ddot{u}} \cdot V_{W\ddot{u}} \cdot C_{W\ddot{u}} \Delta T = 1,0 \text{ kg/l } 100 \text{ l } 4,2 \text{ kJ/kg K } 16 \text{ K} = 1,9 \text{ kWh}$$

je Hektoliter Bier.

Wie der Gärraum, liegt der Lagerraum in einem temperaturstabilen Brauereikeller mit natürlicher Kellertemperatur von 10°C (im Spätsommer bei 12°C). Die Luftaustauschrate kann aufgrund der geschlossenen Lagerung sehr moderat ausfallen. Die mehrwöchige Lagerung (mind. 2-3 Wochen) des Jungbieres erfordert eine mindestens 7-fach größere Lagerkapazität als bereits für die Gärbottiche erforderlich war; für unsere Beispielbrauerei bedeutet das Stahltanks mit einem Volumen von ca. 25.000 hl.

Die Stahltanks könnten direkt (mit Eiswasser/Sole) gekühlt werden; klassische Lagertanks besitzen jedoch keine Einzelkühlung. Die Alternative ist die Absenkung der Raumtemperatur des Lagerkellers auf 0°C. Dazu ist der Lagerkeller durch starkes Mauerwerk und Wärmedämmung gegen die Außentemperatur isoliert und mit einer ausreichend dimensionierten Raumkühlung ausgestattet, die aus soledurchflossenen Rohren aufgebaut ist. (Kunze (2016), 4.3.6). Für den Lagerkeller ist es nicht nötig, dass die Raumluft je Hektoliter Jungbier größer als 0,5-fach des gelagerten Kühlgutvolumens ist.

Die Berechnung der Kühlleistung zur Kühlung des Lagerkellers gründet auf mehreren Annahmen, die wir hier beispielhaft treffen wollen; Für die Lagerung der 25.000 hl Jungbier soll das 1,5-fache Raumvolumen mit einer Dimensionierung 20m x 25m x 7,5m = 3.750m³, bei einer Wandoberfläche zu allen Seiten von 1.675m².

Die Kellerwand sollte zur deutlichen Reduzierung des Wärmedurchgangswertes auf der Innenseite (kalte Seite) isoliert sein. Es bieten sich verschiedenste Isolierungsmaterialien an, die typischerweise eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Isolier}} = 0,04 \text{ W/m K}$ besitzen (BauWissen online (2017)). Eine Isolationsstärke von 4cm liefert einen K-Wert für die Isolierung von 1,0 W/m²K. Der Wärmeübergangskoeffizient zur Luft im Keller, bei freier Konvektion mit maximal $\alpha_{\text{Wand-Luft}} \sim 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ nach Tabelle 5.4 reduziert den k-Wert lediglich auf 0,9 W/m²K. Wird die Wand mit der zweifachen Isolationsstärke von 8cm gedämmt, reduziert sich der k-Wert nach der Berechnungsgleichung in Kapitel 5.1.2. auf 0,48 W/m²K.

Geht man von dem zuletzt berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten aus, erhält man für den Kühlbedarf zur Aufrechterhaltung der Lagerkellertemperatur von 0°C

$$Q_{\text{Lager}} = k_{\text{Wand}} \cdot A_{\text{Wand}} \cdot (t_{\text{Keller}} - t_{\text{Umgebung}}) \cdot \Delta \tau \approx 0,48 \text{ W/m}^2\text{K } 1.675 \text{ m}^2 (0 - 10) \text{ K } 500 \text{ h} =$$

4.020 kWh. Je Hektoliter Bier liegt der Kühlbedarf damit bei 0,16 kWh.

Die Wärmeleitung durch das Mauerwerk des Kühlkellers liegt mit Werten von $\lambda_{\text{Ziegel}} = 0,5 \dots 1,4 \text{ W/m K}$ für Ziegelmauerwerk und von $\lambda_{\text{Granit}} = 2,8 \text{ W/m K}$ für Granitstein um das 20 bis 70-fache höher als der Wert für den Dämmstoff. Für die gleiche Wärmeisolierung, wie sie der Dämmstoff bietet, müsste die Kellerwand je nach Material 1,6 bis 5,6m Dicke aufweisen. Wäre dies der Fall,

würde sich die Wärmeleitfähigkeit der Wand halbieren und der Wärmedurchgangskoeffizient unter Berücksichtigung des konvektiven Wärmeübergangs an die Kellerluft läge ebenfalls bei ca. der Hälfte des vorherigen Wertes. So lässt sich argumentieren, dass der berechnete Kühlbedarf, unter der Annahme entsprechender Isolationsstärke, eine obere Grenze darstellt. Entfällt die Isolierung und verlässt man sich mit einer Kellerwand aus 20cm Granitstein im Wesentlichen auf den Wärmeübergangswiderstand Wand-Luft, so ist läge der Kühlbedarf bei annähernd beim 10-fachen Wert.

5.3. Energiebedarfe im Gesamtprozess

Die Dachorganisation aller europäischen Brauereiverbände „Brewers of Europe“ haben für größere Brauereien mit einer Jahresproduktion von 1 Mio. Hektolitern Anfang der 2000er Jahre Ressourcenverbräuche als Best Available Techniques (BAT) veröffentlicht (Brewers of Europe) und 2012 in einer Studie (Brewers of Europe (2012)) ergänzt:

Thermische Energie: 23,6 bis 33,0 kWh/hl; elektrische Energie (beinhaltet elektrischen Antrieb zur Kühlung): 7,5 bis 11,5 kWh/hl; Gesamtenergie: 20 bis 65 kWh/hl (2012) mit einem Durchschnitt von 32 kWh/hl; Biogasproduktion: 92 l/hl; Frischwasser: 3,7 bis 4,7 hl/hl; (Abwasser: 2,2 bis 3,3 hl/hl). Man sieht die starke Abhängigkeit von Betriebsgröße, Anlagenzustand und Produktspektrum, die in den Brauereien vertreten sind.

Elektrische Energie wird in der Brauerei im Wesentlichen für folgende Prozesse benötigt (Kunze (2016)):

Kälteerzeugung mittels Kompressionskälteanlagen, Druckluftherzeugung, Antrieb von Pumpen und Ventilatoren, Antrieb von Rührwerken und Transportanlagen, Schalten und Steuern von Armaturen, Kommunikation und Datenverarbeitung, Beleuchtung.

Wärmeenergie wird benötigt zur:

Wärmwassererzeugung, Beheizung der Darren, Aufheizen der Maische, Aufheizen und Kochen der Würze, Flaschenreinigung (auch Fässer und andere Gebinde), Pasteurisierung des Bieres (KZE-Anlagen), CIP-Reinigung, Dämpfen von Filtern, Füllern und Rohrleitungen, Gebäudeheizung.

Prozess	1	2	3	4a	4b	5	6	7	8	9
Bedarf	Mälzen	Maischen	Abläutern	Hopfen	Kochen	Klären	Kühlen	Gären	Reifen	Abfüllen
Wärme	1,8 kWh/hl	4,1 kWh/hl	5,1 kWh/hl	< 0,1 kWh/hl	6,9 kWh/hl					X
Temp.	85°C	78°C	78°C	50°C	103°C					80°C
Kälte						1,8 kWh/hl	8,1 kWh/hl	0,15 kWh/hl	2,1 kWh/hl	
Temp.						83°C	10°C	8°C	0°C	

Tabelle 5.6: Berechnete Wärme- und Kältebedarfe aus Kapitel 5.2., für die einzelnen Teilprozesse im Brauprozess sowie der bei der Trocknung von Malz und Hopfen.

	2	3	4b		
Prozess	Maischen	Abläutern	Kochen	Summe	
Wärmebedarf	4,1 kWh/hl	5,1 kWh/hl	6,9 kWh/hl	16,1 kWh/hl	Berechnung der einzelnen Teilprozesse in Kapitel 5
Temp.	78°C	78°C	103°C		
	3,7 kWh/hl	4,7 kWh/hl	7,2 kWh/hl	15,6 kWh/hl	Wärmebedarfe <u>ohne</u> Rückgewinnung im EffizienzSzenario Bild 6.1.
			5,6 kWh/hl	5,6 kWh/hl	Wärmebedarfe <u>mit</u> Rückgewinnung im EffizienzSzenario Bild 6.1.
				4,8 kWh/hl	Brauerei Rittmayer

Tabelle 5.7: Vergleich der berechneten Bedarfe im Sudhaus, dem Effizienz Szenario und einer "Niedrig-Energie-Brauerei"

Spezifischer Wärmeverbrauch unterschiedlicher Prozesse [4]		
Prozess	Bemerkungen	Spez. Kennzahlen
Aufheizen Gesamtmaische	50 °C → 76 °C	2,4..2,5 kWh/hl VB
Würzeaufheizung	72 °C → 100 °C	4,1..4,2 kWh/hl VB
Würzekochung	10 % GesV 5 % GesV	6,9..7,2 kWh/hl VB 3,4..3,6 kWh/hl VB

Tabelle 5.8: Wärmebedarfe aus dem Jahr 2008 (Hackensellner (2008))

Ein Vergleich relativ neuer Daten einer Bedarfsuntersuchung typischer Brauereien (Hackensellner (2008)) kommt bei einer Verdampfung von ca. 5% der Würze auf einen Wärmebedarf im Sudhaus von ca. 10,1 kWh/hl Verkaufsbier. Insbesondere die Prozessschritte Maischen und Würzekochen, müssen in diesen Brauereien von einer Wärmerückgewinnung aus dem Würzekühler profitieren. Es wird also bereits versucht, das Temperaturniveau der anfänglich im Würzekühler abkühlenden Ausschlagwürze, auf ähnlich hohem Niveau, in der Würzepfanne, wieder einzuspeisen. Von der Energieeffizienz ist dieses Prinzip optimal. Ein guter Teil der Restwärme scheint jedoch für andere Bedarfe außerhalb des Sudhauses eingesetzt zu werden, oder die Verluste sind entsprechend hoch.

5.3.1. Kältebedarfe vom Whirlpool bis zur Abfüllung (sowie zur Hopfen-Pelletierung)

Nach einer Veröffentlichung von Schu aus dem Jahr 1994 (Schu) besteht für den Brauprozess folgender Kältebedarf:

- Würzekühlung (Kühlung der Ausschlagwürze nach dem Whirlpool, vor der Gärung): 1,7 bis 2,2 kWh/hl
- Gärung und Tiefkühlung (Erhaltung der Gärtemperatur und anschließendes Kühlen zur Lagerung): 1,3 bis 2,4 kWh/hl
- Raumkühlung und sonst. (u.a. Gär- und Lagerkeller): 2,8 bis 5,3 kWh/hl

Das ergibt einen Gesamtbedarf von 5,7 bis 10,5 kWh/hl, also eine recht große Bandbreite, welche die Unterschiede im Produktionsvolumen, der Produktvielfalt, der Prozessführung, der Anlagenqualität und dem baulichen Zustand der Räumlichkeiten und Gebäudetechnik widerspiegelt.

Würzekühlung, einstufig, o. zweistufig: heiße Ausschlagwürze gekühlt durch kaltes Brauwasser, danach Kältemittel gekühlte Würze Kältebedarf (2-stufig): 2660 kJ/hl bzw. 440 kJ/hl K z.B. bei 15°C Übertrittstemperatur auf 9°C Anstelltemperatur

6 Effizienzoptionen im Brauprozess und seiner Energie-Bereitstellung

6.1. Energieeffizienzstrategie im Brauprozess

Bei der Suche nach Möglichkeiten zur Erhöhung der Energieeffizienz von Produktionsprozessen gilt es zunächst die einzelnen Prozessschritte zu untersuchen. Jeder Prozessschritt hat eine Aufgabe in der Herstellungskette für das Produkt zu erfüllen. Der Brauprozess ist eine Hintereinander-Reihung von Prozessschritten, welche die verschiedenen Vorstufen des Bieres durchlaufen. Gerade der Brauprozess ist historisch entstanden und hat über mehrere Jahrhunderte eine Entwicklung genommen, in der zunehmende Erfahrungen mit den Rohstoffen, und deren Verhalten in Bezug auf die Qualität des Produktes eingeflossen sind. Über die Zeit hat sich immer mehr der Anspruch entwickelt, dass Bier einer bestimmten Brauerei von gleichbleibender, verlässlicher Qualität und spezifischem, gleichbleibendem Geschmack und Haltbarkeit erwartet wird. Aus der privaten Bierküche ist zunächst ein regionaler, später überregionaler Wirtschaftszweig geworden. Viele Details der Behandlung des Malzes, des Hopfens, beim Vermischen von Malz und Wasser, den Rasttemperaturen beim Maischen, sowie der richtigen Zeit des Kochens und später des Gärens müssen dabei für ein bestimmtes Bier und den von ihm erwarteten Geschmack, genau eingehalten werden. Trotzdem ist es so, dass sich die bereits genannten Einflussfaktoren, Zeiten, Temperaturen, Wärme- und Kältezufuhren von Brauerei zu Brauerei z.T. stark unterscheiden. So sieht man einerseits sehr unterschiedlich konstruierte Maischgefäße, Abläutertechniken im Läuterbottich, Gär- und Reifezeiten des Bieres, aber am historisch gewachsenen Prozess werden insbesondere Traditionsbrauereien nur mit Prozessänderungen herangehen wollen, wenn es das die Eigenschaften der einzelnen Zwischenschritte auf dem Weg zum Endprodukt nicht beeinflusst. Einflussfaktoren, in einem einzelnen Prozessschritt können in einem späteren Prozessschritt nicht wieder korrigiert werden.

6.1.1. Wärme- und Kältebedarfskopplung eines ausgewählten Brauprozesses

Für die Energieeffizienz der einzelnen Prozessschritte bedeutet dies z.B. für den Maischprozess, dass die Rasttemperaturen bei denen die Maische verharren soll, die Dauer dieser Rasten, die Rührintensität mit der die Maische zur Verbesserung des Wärmeübergangs bewegt und damit möglicherweise auch geschert werden wird, die Verweilzeitverteilung der Maische vor dem Abläutern und die Menge und Temperatur des Anschwänzwassers, nicht zur Disposition stehen. Eingriffe in den Energiebereitstellungsprozess der einzelnen Prozessschritte sind daher brauereispezifisch vorzunehmen.

Sind die einzelnen Prozessschritte, mit ihren jeweiligen Aufgaben im Entstehungsprozess des Produktes sichergestellt, werden sie zu einer Kette zusammengefügt, bei der der zeitliche Ablauf wichtig sein kann. Der Braumeister wird aus Erfahrung oder auch aufgrund der Beurteilung von Proben einen Abbruch der einzelnen Prozessschritte kurzfristig beschließen, und der nachfolgende Schritt muss dann zeitnah durchgeführt werden können.

Für die effiziente Bereitstellung von Energie bedeutet dies, dass der gewünschte Ablauf der Kette der Einzelprozesse unterstützt wird. Kühlungs- oder Erhitzungsvorgänge müssen zum bestimmten Zeitpunkt und mit gewünschter Geschwindigkeit erfolgen. Thermische Belastungen des Produktes (z.B. lokales Überhitzen oder Gefrieren) müssen vermieden werden, soweit sie einen ungeplanten Einfluss auf das Produkt haben.

Durchläuft das Produkt in seinem Produktionsprozess eine Kette von Prozessstufen, so können die einzelnen Stufen dieser Kette jedoch in prozesstechnischer Hinsicht gekoppelt sein, ohne dass das Produkt dies „mitbekommt“, also ohne die Zustandsänderungen des Produktes, durch Veränderung der Umgebungsbedingungen, in einer produktbeeinflussenden Weise zu beeinflussen. Die Kopplung zwischen nicht nacheinander ablaufenden Prozessschritten ist dann jedoch günstiger Weise durch eine Speicherlogik in zeitlicher Hinsicht wieder entkoppelt; für die Nutzung von Energieeffizienzpotentialen bedeutet dies, dass Wärme- oder Kälte die in einem Prozessschritt abgegeben werden muss, zeitlich versetzt einem anderen Prozessschritt angeboten werden kann. Eine Zwischenspeicherung ist meist aufgrund des Zeitplans der Prozessschritte nötig, dient aber auch zur Sicherheit vor unerwünschten Rückkopplungseffekten.

In dieser Arbeit geht es nicht vorrangig um die energetische Optimierung der Einzelprozessschritte, da diese zunächst von den produktführenden Behältern vorgegeben wird, z.B. dem Maischbottich oder der beheizbaren Ausführung der Maischpfanne, der Würzepfanne und dem Whirlpool, mit ihren jeweils sehr verschiedenartig ausgeführten Rühr- und Beheizungstechnologien, und der für die Förderung der erwünschten biologischen und verfahrenstechnischen Vorgänge optimierten Anlagenteile.

Zwei Beispiele für die Optimierung eines Prozessschrittes sollen hier jedoch gegeben werden:

In der Vergangenheit ist das aus der Würzepfanne beim Kochen verdampfende Wasser oftmals ohne Kondensation an die Umgebung abgegeben worden.

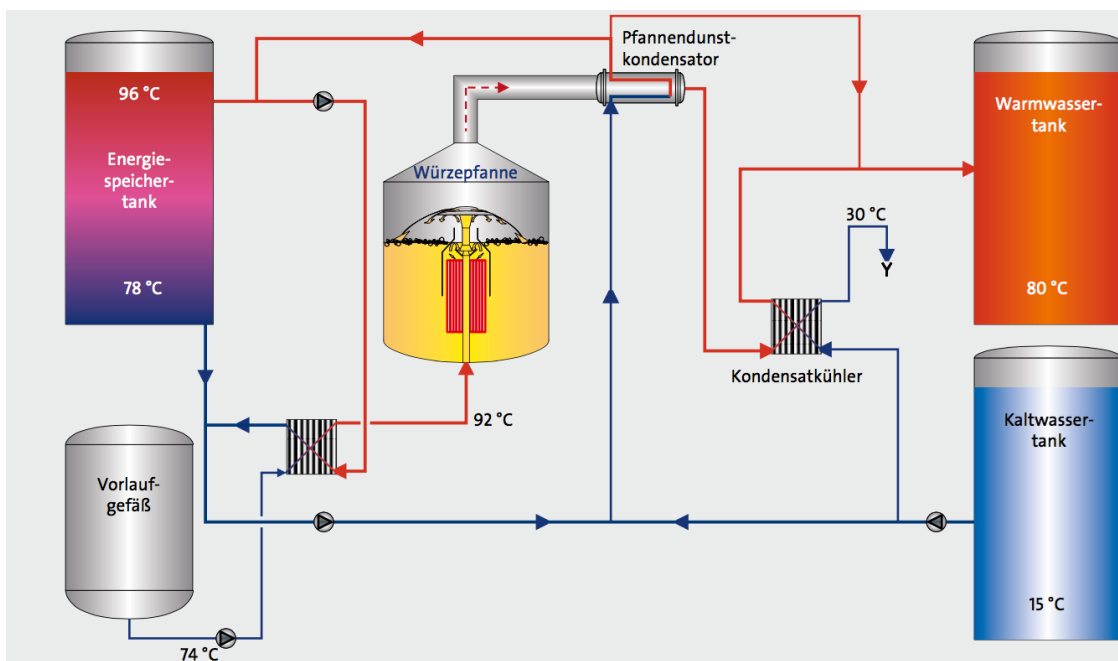


Bild 6.4: Nutzung der Verdampfungswärme im Pfannendunstkondensator

Die Firma Krones (Krones) bietet bei einer ihrer Technologien die bedarfsorientierte Nutzung der Kondensationswärme des zuvor aus der Würze verdampften Wassers an. Liegt die Gesamtverdampfung bei 4 oder mehr Prozent, wird die verfügbare Energie bis 4 Prozent für die Erhitzung der Vorderwürze vor Eintritt in die Würzepfanne eingesetzt; Hier kann das ganze Temperaturpotential des

ca. 99°C heißen Kondensats genutzt werden. Die Energie aus Verdampfungsanteilen von über 4 Prozent der Pfannenwürze wird zur Warmwasserproduktion auf einem Temperaturniveau bei ca. 80 °C genutzt.

Das zweite Beispiel ist stärker noch auf die Effizienzsteigerung im Teilprozess bezogen, nämlich die Umstellung des Aufheizverfahrens beim Maischen. Historisch wurde die Maische immer mit dem Dekoktionsverfahren beheizt, d.h. Teile der Maische wurden extern in Heizern aufgebrüht und dem Maischbottich wieder zugeführt. Bei der direkten Beheizung der gesamten Maische in einer Maischpfanne, beim heutzutage eher angewendeten Infusionsverfahren, gab es früher die Schwierigkeit, die Temperatur der Maische bei den Rasten genau einzustellen. Kunze (Kunze (2016)) gibt an, dass das Infusionsverfahren in der Praxis jedoch ca. 10% weniger Energie beim Aufheizen der Maische benötigt als das Dekoktionsverfahren. Die Nutzung der alten Maischbottiche und der mögliche Einfluss einer Verfahrensänderung auf den Geschmack des Bieres, können Argumente sein diese Effizienzsteigerung auszulassen.

Wenden wir uns den thermischen Erfordernissen entlang der Prozesskette zu, so kommt es dabei hierbei sehr auf Timing der Energiebereitstellung an. Mit leicht variablen Zeitpunkten, wann der nächste Schritt zu vollziehen ist, kann auf „Zuruf“ des Braumeisters die nächste Phase, der nächste Prozessschritt eingeläutet werden. Daher bedarf es der Speicherung von Wärme- oder Kälte, um über die zeitliche Versetzung der Teilprozesse hinweg, Energieeffizienzpotentiale realisieren zu können.

Im Folgenden wird versucht, einen Vorschlag für die Ausschöpfung von Energiepotentialen durch Kopplung der Prozesse des Brauprozesses darzustellen. Es wird sich dabei auf die Wärme- und Kältebedarfe des Hauptenergieträgers im Brauprozess, dem zum größten Teil aus Wasser bestehenden Produktes und seiner Vorstufen konzentriert. In Kapitel 2 wurde der Maischprozess einerseits für die typischen Raststufen eines Infusionsverfahrens in Bild 2.2b dargestellt, ein Anschwänzen im Läuterbottich mit entsprechend Bild 4.4, bei dem der Anteil der Nachgüsse recht genau denen in der Brauerei Sünner, Köln entspricht (80hl Maischwasser mit 96hl Nachgüssen), ein Kochen mit einer Verdampfung in der Maischpfanne von 4-6% des Volumens, und eine anschließende Gärung mit obergäriger Hefe bei 15-18°C, mit nachfolgender Reifung, mit für alle Biere einheitlicher Lagertemperatur von 0-1°C. Die Raststufen beim Maischprozess wurden durch Zu-brühen von außerhalb des Maischbottichs erhitztem Frischwasser eingestellt.

Für diese Prozessbedingungen sind in Kapitel 5 die Wärme- und Kältebedarfe der einzelnen Prozessschritte berechnet worden. Im Folgenden wird ein in Bild 6.1 anhand einer Verbundkurve dargestellter Prozess beschrieben, wie eine möglichst vollständige Nutzung der Wärme- und Kältepotentiale entlang der Prozesskette vom Ansetzen der Maische bis zum Beginn der Gärung des Bieres aussehen kann.

Wir betrachten beispielhaft einen Brauprozess mit einer Ausschlagmenge von 215 hl Bier, was näherungsweise auch der Menge des Verkaufsbiers entspricht. In der Maische kommen damit 100 hl Frischwasser und üblicherweise 17 kg/hl Malz zum Einsatz.

In einem Wärmeübertrager wird in einem der Strömungskanäle 100 hl Frischwasser von Brunnen-temperatur 10°C auf zunächst 60°C erhitzt. Für das Ansetzen der Maische werden davon 22 hl mit dem Malz (1.700 kg) zu einer konzentrierten Maische bei 50°C vermischt. Die Wärmeaufnahme durch das mit zu erwärmende Malz ist in der Wärmeaufnahme von 570 kWh berücksichtigt. Die verbleibenden 78 hl Frischwasser werden in einem Wärmeübertrager weiter auf 75°C erhitzt, und 21 hl davon werden nach der Maische-Rastzeit von 30 Minuten dem Maischbottich zugeführt; es entsteht die gewünschte

Rasttemperatur der Maische von ca. 62°C. Zu diesem Zweck ist es nötig die entnommene Wassermenge in einem isolierten Zwischenspeicher zu lagern. Die restlichen 57 hl werden weiter auf 90°C erhitzt und nach weiteren 30 min vollständig der Maische zugeführt; damit erhält man 100 hl Maische bei einer Temperatur von 78°C. Mit Beendigung des Maischeprozesses wird die Maische im Läuterbottich abgeläutert (wärmeneutral). Weitere 130 hl auf 78°C erhitztes Frischwasser (s. rechts in Bild 6.1) werden in Form von Nachgüssen zum Anschwänzen (auslaugen der abgesetzten, nicht gelösten Malzanteile) im Läuterbottich zugeführt. Die somit erhaltenen 230 hl Vorderwürze wird nun vor Eintritt in die Würzepfanne in einem Wärmeübertrager auf 90°C vorerhitzt (s. links im Bild 6.1). Zu diesem Zeitpunkt bei 90°C haben die 230 hl Vorderwürze 2.128 kWh (= 570+133+97+1012+316) Wärme aufgenommen.

Betrachtet man im Gegenzug die Wärmebereitstellung für diese Erhitzung des Maischewassers durch die von Feststoffen befreite Ausschlagwürze (nach dem Whirlpool), die nach der Verdampfung von ca. 6% der Masse in der Würzepfanne ein Volumen von ca. 215 hl besitzt. Diese Würze wird im zweiten Strömungskanal der jeweiligen Wärmeübertrager geführt und muss jetzt aufgeteilt werden.

Um die 97 kWh und etwas Reserve für die Verluste beim Wärmeübertragen aufzubringen, werden 50 hl Würze von 99 auf 82°C abgekühlt. Die Wärmekapazitäten des Frischwassers (4,15 kJ/kg K) und der Würze (4,0 kJ/kg K) unterscheiden sich nur geringfügig, die Dichten ebenfalls. Damit sollten die Volumen- oder Massenströme auf beiden Seiten des Wärmeübertragers von ähnlicher Größenordnung sein, um eine näherungsweise konstante Temperaturdifferenz zwischen den beiden Flüssigkeiten über dem Übertragungsweg beizubehalten. Für eine ökonomisch sinnvolle Größe der Wärmeübertragungsflächen sollte als Daumenregel in der Praxis eine Temperaturdifferenz von mindestens 4K zwischen den beiden Flüssigkeiten bestehen.

Die verbleibenden 165 hl Würze können im Gegenstrom zu den 230 hl Maische vor der Würzepfanne geführt werden. Der Unterschied im Volumen der beiden Flüssigkeiten führt zu einer stärkeren Abkühlung der Würze; es ist darauf zu achten, dass die Temperaturdifferenz am Austrittsquerschnitt für die Würze, bzw. Eintrittsquerschnitt für die Maische nicht zu gering wird (hier, 4K).

Die bei 82°C nun wieder zur Verfügung stehende Würze kann zu einem Teil (28 hl) zu den 50 hl in den Wärmeübertrager eingespeist werden, der die Erwärmung der Maische von 60 auf 75°C ermöglichen soll. Mit dem anderen Teil (137 hl) wird die Wärmemenge bereitgestellt, die zur Erwärmung des Anschwänzwassers von 10 auf 78°C erforderlich ist.

Hiermit ergibt sich für den unteren Temperaturbereich zur Erwärmung der 100 hl Frischwasser von 10 auf 60°C, dass 18 hl (=96-78) Warmwasser bei > 65°C zusätzlich benötigt werden, um weitere 105 kWh an Wärme abzugeben.

Im oberen Temperaturbereich in der Würzepfanne werden noch 264 kWh benötigt, um die Vorderwürze zum Sieden bei Umgebungsdruck auf 100°C zu erwärmen und weitere 970 kWh (incl. Besonders hier auftretender Wärmeverluste) um von der Würze 15 hl zu verdampfen. Die

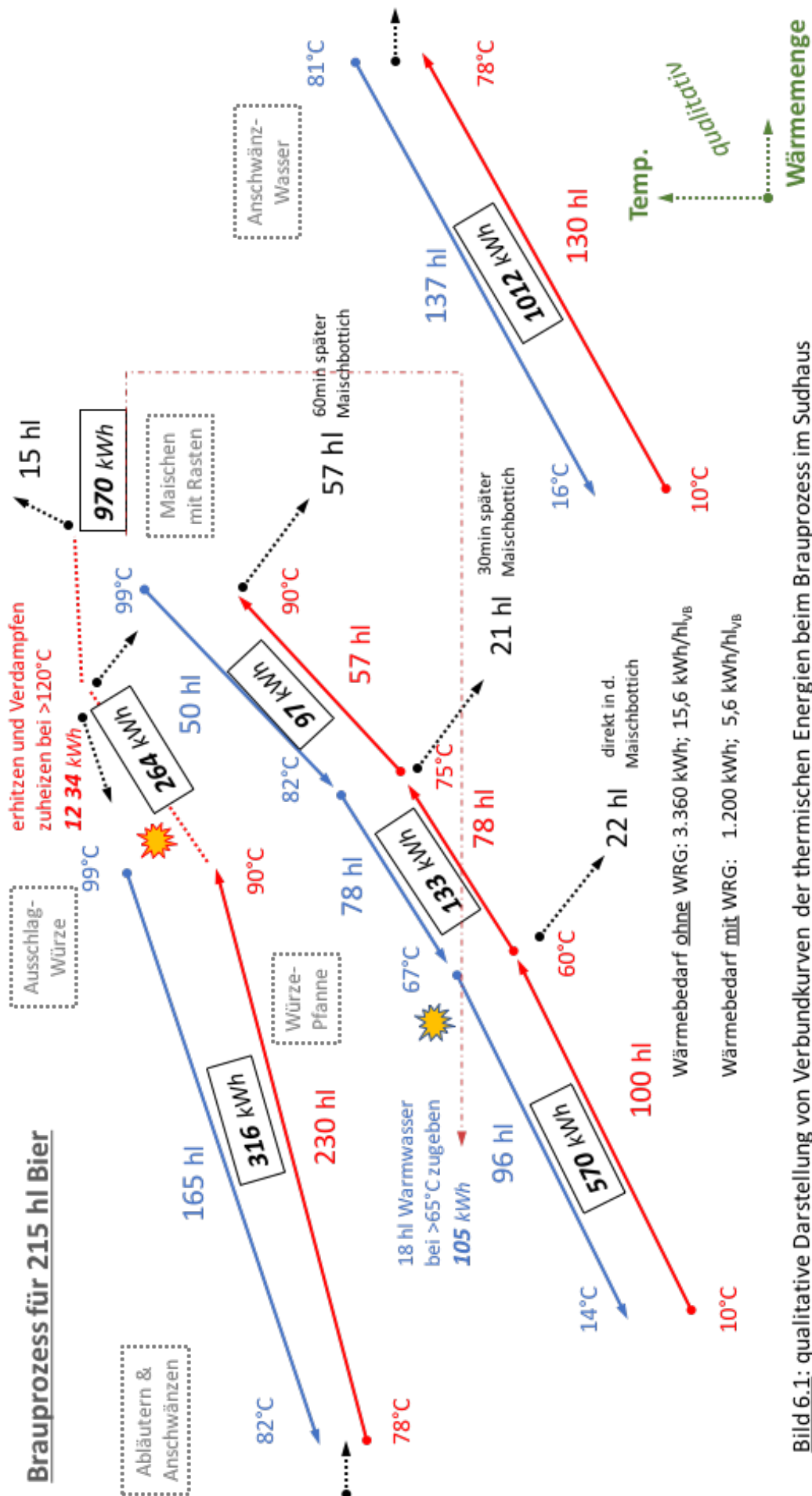


Bild 6.1: qualitative Darstellung von Verbundkurven der thermischen Energien beim Brauprozess im Sudhaus

Verdampfungsenthalpie kann z.T. durch Kondensation zurückgewonnen werden, jedoch steht die Wärme unter der Annahme, dass dies bei Umgebungsdruck geschieht, nur bei maximal 100°C zur

Verfügung. Ein Teil der Erhitzung der Vorderwürze auf dem Weg zum Siedepunkt könnte damit noch erreicht werden. Die bei 65°C benötigten 105 kWh können aber damit abgedeckt werden.

Die Wärmezufuhr beträgt über diesen Prozessabschnitt vom Einmaischen bis zum Kochen und Verdampfen der Würze 3.362 kWh (entspricht 15,6 kWh/hl_{AW}). Die abzukühlende Ausschlagwürze kann bis auf ca. 1.200 kWh am oberen Temperaturbereich diese bereitstellen, also ca. 2160 kWh. Das letzte „Stück“ auf dem Weg zum Sieden der Vorderwürze und die Verdampfung, erfordert ein Zuheizen bei >120°C.

Bei dieser Maximierung der Wärmerückgewinnung kommt heraus, dass noch ca. 850 kWh Wärme bei hoher Temperatur von >95°C zur Verfügung stehen, um Verluste beim Transport und der Speicherung der Wärmeträger sowie bei der Wärmeübertragung auszugleichen.

Die Würze jedoch direkt als Wärmeträger einzusetzen führt an die oben bereits erwähnten Grenzen der Kopplung entlang der Produktionskette. Die zeitliche Taktung von Maischvorgang und kurzfristiger Abkühlung der Ausschlagwürze aus einem vorangegangenen Sud erlaubt es nicht, die Wärme der Ausschlagwürze von dieser direkt zu übertragen. Es ist also erforderlich, mit dem damit einhergehenden Verlust an Temperaturpotential, die Wärme von der Ausschlagwürze im Würzekühler zunächst an einen Zwischenträger zu übergeben. Frischwasser kann bei annähernd gleichem Massenstrom, 215 hl, im Gegenstrom mit einer Temperaturdifferenz zur Würze von 5K geführt werden, und dann in einem Speichertank bei ca. 93°C bis zur Anwendung gespeichert werden. Das Nachheizen mit Wärme aus der Verdampfung wird das Potential der Wärme dieses Wärmeträgers anheben, dass hiermit die Aufheizaufgabe erfüllt werden kann, die theoretisch die Ausschlagwürze hätte vornehmen können.

Oftmals findet in Brauereien mit einem historischen Anlagenpark keine Wärmerückgewinnung statt, und die 15,6 kWh/hl_{AW} fallen als Minimum an Wärmebedarf an. Ebenfalls die Kälteleistung von insgesamt ca. 9,4 kWh/hl_{AW} fällt an, sofern nicht durch Einfüllen der heißen Ausschlagwürze in einen offenen Gärtank eine natürliche Abkühlung mit Verdunstungsunterstützung auf ca 50-60°C abgewartet wird, wobei die Wärme aus dem Keller herausgelüftet werden muss.

Der Wärmebedarf mit Wärmerückgewinnung kann bei dem besprochenen Prozess auf 5,6 kWh/hl_{AW} reduziert werden. Die Ausschlagwürze ist damit ohne Kühlaufwand von 99°C auf Gärtemperatur von 15°C, für obergäriges Bier, heruntergekühlt worden.

Mit einem üblichen Industriewärmepreis von 0,05 Euro je kWh Wärme, einer Leistungszahl einer mechanisch angetriebenen Kältemaschine von 2,5 bis 4, und einem Strompreis für die Industrie von 0,170 Euro je kWh, beläuft sich die Einsparung von 10,0 kWh/hl_{AW} Wärme auf 0,50 Euro/hl_{AW} und die Einsparung von 9,4 kWh/hl_{AW} Kälte auf 0,40 – 0,64 Euro/hl_{AW}. Den „Halben“ Liter Verkaufsbier entlastet die Optimierung des Wärme- und Kälteeinsatzes um knapp 0,6 Cent.

6.1.2. Energieeffizienzstrategien in Brauereien – Strategien von Anbietern und aus Untersuchungen

Für die Brauerei Rittmayer in Hallerndorf, die ihre Produktion zur „Niedrig-Energie-Brauerei“ umgestellt hat, wird ein Primärenergiebedarf (Wärme) von 4,8 kWh/hl Ausschlagwürze angegeben; allgemein wird ein Wärmeverbrauch von 5 kWh/hl Ausschlagwürze als Zielwert auch bei geringen Sudfolgen und größeren Sudpausen in der Praxis propagiert (Pfister). Den thermischen Energiebedarf (im Sudhaus) auf bis zu 3,7 kWh/hl im Einzelfall reduzieren zu können, unterschreitet jedoch den in dieser Arbeit gefundenen Mindestbedarf, und darf m.M.n. als sehr ambitioniert gelten.



Ein zweistufiger Wärmeübertrager kühlt zuerst mit 12 °C kaltem Brunnenwasser und dann mit –4 °C kalter Sole die Würze von 96 auf 8 °C ab.



Die 5 bis 8 °C warme Sole aus dem Rücklauf wird auf –4 °C gekühlt und zunächst in den etwa 5 m³ großen Pufferspeicher gepumpt, von wo aus sie zu den einzelnen Verbrauchern gelangt.

Bild 6.2: Würzekühler Würze-Sole auf die Gärtemperatur von untergäriger Hefe bei ca. 8°C; Kühlung der Sole im Kälteanlagenverdampfer zur allgemeinen Verfügbarkeit bei -4°C in der Vereinsbrauerei Greiz (Millhoff (2014))

Mit dem Einfüllen der auf 15°C abgekühlten Würze in die offenen Gärbehälter im Gärkeller haben wir bis zur Abfüllung und Pasteurisierung des Biers nur noch Kältebedarfe zu decken. In Brauereien, die mit untergäriger Hefe gären, ist vor dem zugeben der Hefe die Temperatur auf 8°C abzusenken, was mit ungekühltem Frischwasser nicht zu erreichen ist. Kältebedarfe zur Kühlung des Jungbiers auf 0°C für die Lagerung und kühthalten des Lagerkellers erfordert einen Kälteträger, Sole bei Temperaturen von höchstens -4°C. Der Plattenwärmeübertrager zur Würzekühlung in der Vereinsbrauerei Greiz in Bild 6.2 vollzieht die Kühlung der Würze zunächst bis zur einer Temperatur von 12 Grad plus minimale

Temperaturdifferenz ab, wie auch im Beispielprozess (Bild 6.1) und nutzt erst für die weitere Absenkung der Temperatur der Würze die gekühlte Sole. Der Pufferspeicher ermöglicht es, Sole vorrätig zu halten und bei zeitlich beschränkten hohen Kühlbedarfen eine Kühlleistung abzufragen, welche die Nennleistung der Kälteanlage deutlich übersteigt.

Laut einer Broschüre vom Anbieter von Anlagen für Brauereien der Firma Bosch GmbH (Q: Bosch) beträgt der Energiekostenanteil der Brauereien (in Deutschland) im Durchschnitt bei bis zu 10% der Gesamtkostenstruktur; dies wird mit ca. 5 Euro/hl angegeben, also 2,5 Cent je halber Liter. Der Stromanteil, der in den meisten Fällen die Kälteerzeugung beinhalten dürfte, liegt bei ca. 25%, die verbleibenden 3/4 der Energiemenge sind Gas oder Öl. Bosch gibt an, dass „unter 80 °C ... häufig Abwärme recycelt werden (kann)“. Gemeint sein kann damit nur, dass Wärmebedarfe bei Temperaturen unter 80°C häufig durch Recycling von Wärme höherer Temperatur oder ggf. auch Wärme von niedrigerer Temperatur, unter Einsatz von Wärmepumpen, möglich ist. Der „spezifische Wärmeenergieverbrauch bezogen auf die Produktmenge“ wird bei Bosch (Bosch) mit 18 kWh/hl Bier als Minimalwert und mit 39 kWh/hl als Durchschnittswert für die Brauerei angegeben. Hierin enthalten sind die Wärmebedarfe für die Flaschenreinigung, das Kurzzeiterhitzen des Bieres im Abfüllprozess und CIP (Cleaning-in-Process).

Es wird ebenfalls darauf verwiesen, dass die Abwärme beim Betrieb von Kälteanlagen nicht über Rückkühlwerke abgegeben, sondern z.B. zu Heizzwecken genutzt werden sollte.

Die Abwärme der Kälteanlagen entspricht vom Betrag her der Summe aus Antriebsenergie und der Kälteleistung der Kälteanlage (s. Kapitel 3). Betrieben werden müssen Kälteanlagen im kontinuierlichen Betrieb im Wesentlichen zur Kühlung der Lagerräume und in gewissem Umfang zur Kühlung der Frischluft für den Gärkeller. Die Kälteanlagen, die ihre Kälteleistung für den Kühlkeller bei Temperaturen unter 0°C an eine Sole abgeben, sollten für einen günstigen Betrieb mit einer möglichst hohen Leistungszahl so ausgelegt sein, dass die Abwärme bei niedriger Temperatur an die Umgebung abgegeben wird (s. Kapitel 3). Entsprechend wäre der Einsatz einer Wärmepumpe nötig um diese Abwärme auf ein verwertbares Niveau anzuheben, z.B. zur Vorwärmung von Wasser bei der Flaschenspülung oder für die Kurzzeiterhitzung des Bieres vor der Abfüllung.

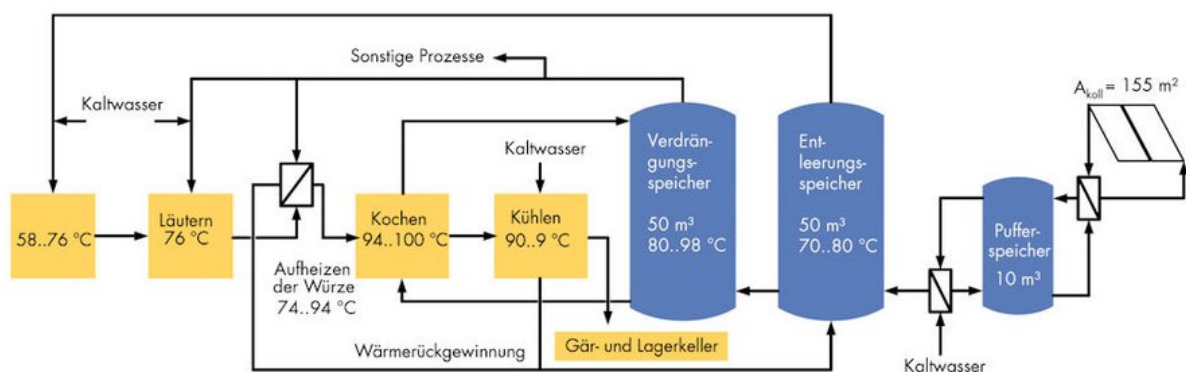


Bild 6.3: Anlagenschaltbild für den warmen Teil eines Brauprozesses mit Speichertanks bei der EnEff: Industrie (EnEff)

Es gibt einige Anlagenschaltbilder, die auch die Speichertanks für warme Medien und ihre Temperaturen darstellen. Angefangen beim gelben Block links im Bild 6.3 wird aus dem Entleerungsspeicher mittlerer Temperatur (70-80°C) die Maische durch Zufluss auf 76°C Endtemperatur gebracht. Im Läuterbottich wird aus dem Verdampfungsspeicher (80-98°C) heißes Wasser zum Anschwänzen hinzugegeben, welches mit einer Kaltwasserzugabe auf die optimale Temperatur heruntergemischt wird. Aus dem Verdampfungsspeicher, der als Schichtspeicher mit unterschiedlichen Temperaturniveaus innerhalb des Speichers ausgelegt ist, wird fast siedendes Wasser zur Erhitzung der Vordermaische aus dem Läuterbottich zum Kochen in der Würzepfanne vorbereitet; es werden in diesem Aufbau 94°C in der Vorderwürze erreicht. Die anfängliche Temperatur von 76°C der Vorderwürze lässt eine Abkühlung des Wassers aus dem Verdrängungsspeicher auf höchstens 78°C zu, womit dieses Wasser dann in den kühleren Entleerungsspeicher eingespeist wird. Verdampfendes Wasser aus der Würze gelangt in den Verdrängungsspeicher, wo es mit seiner Verdampfungswärme die Temperatur anhebt. Der Kochvorgang muss jedoch mit Energie versorgt werden, deren Bereitstellung in diesem Anlagenbild nicht dargestellt ist. Die Temperatur der der Würzepfanne zugeführten Wärme muss deutlich über dem Siedepunkt der Würze von ca. 100°C liegen. Die schließlich mit Kühlwasser im Kühler auf 9°C gekühlte Ausschlagwürze gelangt für die kalten Prozessschritte in den Gär- und Lagerkeller. In diesem Anlagenschema ist auch die Einbindung von Solarthermie als Wärmebereiter für das Warmwassersystem dargestellt.

In der Hofmühl-Brauerei in Eichstätt werden Vakuumröhrenkollektoren zur solarthermischen Wärme-gewinnung bis Temperaturen von 120°C eingesetzt. Auf die Solarwärme wird sich jedoch beim Prozessschritt des Verdampfens in der Würzepfanne noch nicht verlassen (Q: enEff).

Eine aktuell von der Firma Krones/Steinecker (Krones) angebotene Anlagenerweiterung, im Anlagenschaltbild (Bild 6.4) grün hinterlegt, wird die vollständige Nutzung der Wärme in der Ausschlagwürze vorgeschlagen und eine entsprechende Speichermöglichkeit vorgestellt. Die Maischeerhitzung erfolgt aus einem Energiespeichertank mit Schichtladelanze. Dabei kann die Maischebereitung sowohl im Infusionsverfahren, als Erhitzung über die Bottichwand, wie auch im Dekoktionsverfahren, mit Zugabe heißen Wassers in den Maischebottich, erfolgen. Der Energie-speichertank wird versorgt mit Heißem Wasser von 95-96°C aus einer ersten Stufe des Würzekühlers für die Ausschlagwürze. In der zweiten Stufe wird dann die Ausschlagwürze von ca. 82°C auf 6-14°C, je nach Gärtemperatur (ober- oder untergärig), mit gekühltem Frischwasser im Gegenstrom heruntergeköhlt, während sich das Frischwasser auf bis auf ca. 78°C erhitzt, und als Brauwasser für den nächsten Sud zur Verfügung steht. Das beim bei der Beheizung über den Mantel der Maischpfanne je nach aktueller Rasttemperatur in der Maische abfließende Rücklaufwasser wird entsprechend seiner Temperatur mittels einer Schichtladelanze in unterschiedlichen Zonen des Energiespeichers „gestapelt“.

Die Anlage folgt dem Prinzip, dass die gesamte Wärmeenergie der Würze dem Prozess auf zwei Temperaturniveaus wieder zur Verfügung gestellt wird. Damit wird die Nutzung der Wärmeenergie zur Vorerhitzung der Vorderwürze (im Läuterwürzeerhitzer) ermöglicht. Die im Pfannendunstkondensator rückgewonnene Verdampfungswärme des verdampfenden Teils der Würze unterstützt die Bereitstellung des heißen Wassers im Energiespeicher bei Temperaturen von >95°C. Der ganze gekoppelte Prozess muss also nur an der Stelle der höchsten Temperatur des Prozesses, beim Verdampfen der Würze in der Pfanne, mit Wärmeenergie bei noch höherer Temperatur versorgt werden. Die Zu-heizung ist in dem Anlagenschaltbild (s.Bild 6.4) ebenfalls nicht berücksichtigt, ergibt sich aber aus der notwendigen Verdampfungstemperatur von knapp oberhalb 100°C.

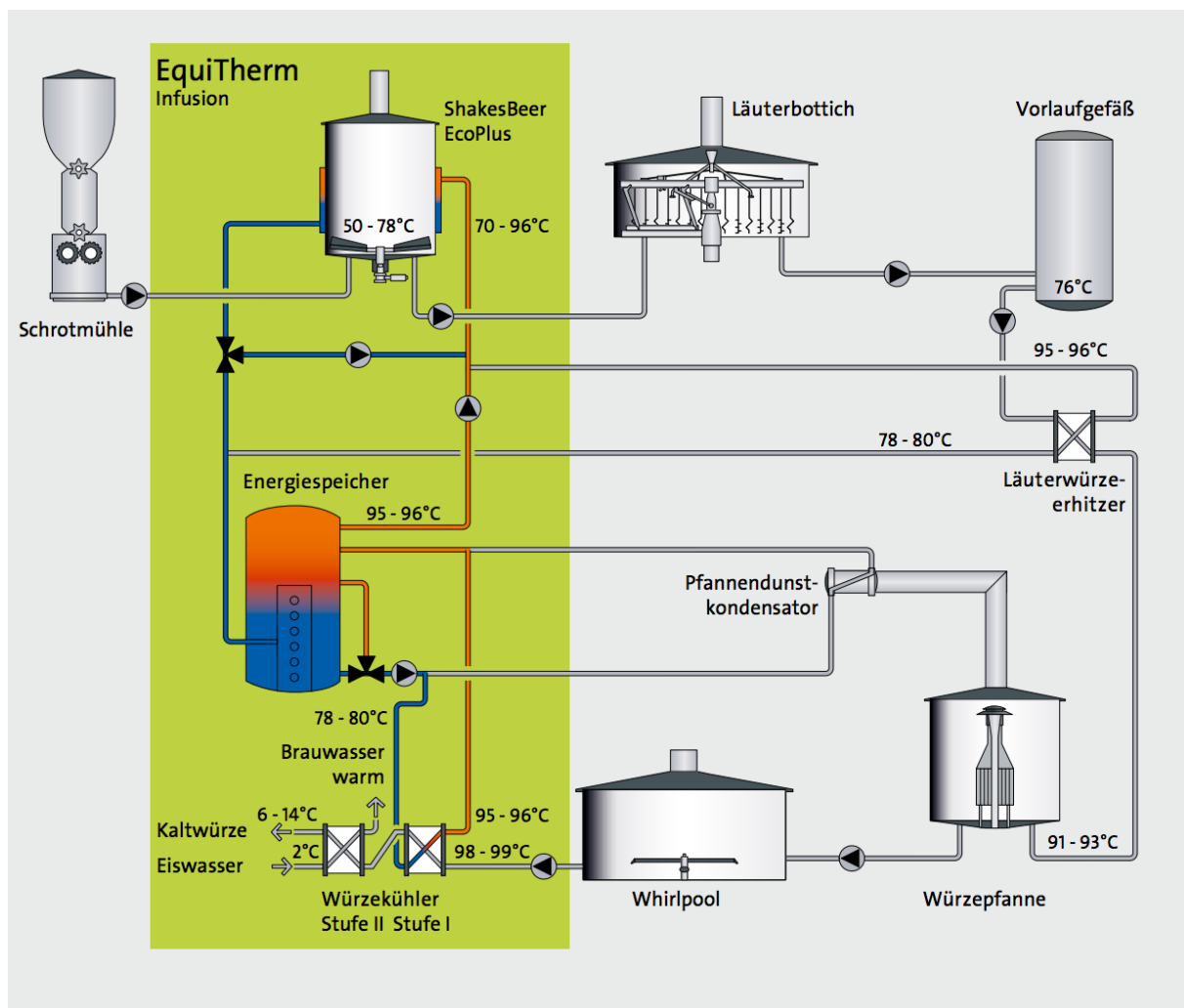


Bild 6.4: Anlagenschaltbild für einen energieeffizienten Brauprozess des Anlagenherstellers Fa. Krones/Steinecker (Krones)

Historisch ist die Wärme der Ausschlagwürze im Würzekühler für das Aufheizen von Brauwasser bereits ab 1880 als früheste Energieeffizienzmaßnahme eingesetzt worden (Single (2014)). Der Energiebedarf (thermisch und elektrisch) konnte durch ständige Effizienzverbesserung von um das Jahr 1900 üblichen 80-100 kWh/hl Verkaufsbier auf 39 kWh/hl in einer „Best-Practice“ Brauerei im Jahr 2011, und unter Anwendung der „Good Engineering Practice“ im Jahr 2013 auf 27 kWh/hl Verkaufsbier reduziert werden. Weitere Optimierungen durch Abwärmenutzung sollen möglich sein (Single (2014)).

Die in Veröffentlichungen genannten Energieverbrauchsdaten variieren z.T. ganz erheblich, und in den meisten Fällen geht nicht eindeutig hervor, welche Verbräuche genau berücksichtigt sind. Dennoch scheinen sich die verschiedenen Brauereien auf einem sehr unterschiedlichen Stand der Technik bzw. Ausgangsstand hinsichtlich Energieeffizienz zu befinden. Es hat den Anschein, dass die Verbesserungen in den letzten Jahren weniger auf der Entwicklung ganz neuer Techniken beruhen, als vielmehr darauf zurückzuführen sind, dass etablierte Brauereien aus energetischen Gesichtspunkten keinen Totalabriss und Neuaufbau ihres Brau- und Abfüllprozesses vornehmen, sondern eigentlich nur marode gewordene Technik sukzessive durch moderne Lösungen ersetzen, ohne eine Gefährdung des

laufenden Betriebs sowie der Qualität des Bieres zu riskieren. Dampferzeugung ist, wie oben bereits festgestellt, für die Wärmezulieferung beim Verdampfen nötig, und liefert mit Einbeziehung sämtlicher Rückgewinnungspotentiale einen Überschuss an niedertemperierter (Ab-)Wärme, deren Nutzung eine Herausforderung an die Prozessgestaltung unter ökonomischen Gesichtspunkten stellt; der Einsatz von Wärmepumpen, sowie der Transport der Wärme vom Sudhaus zur räumlich oft weit entfernten Flaschenreinigung und Abfüllung, müssen unter diesem Gesichtspunkt gesehen werden.

Zu den wärmeintensiven Prozessen, die generell durch überschüssige Wärme im mittleren Temperaturbereich versorgt werden können, zählen neben dem Aufheizen der Maische und des Anschwänzwassers, die Pasteurisierung und die Flaschenreinigung. Über Warmwasserspeicher können Erzeugung und Abnahme der Wärme zeitlich entkoppelt werden.

Kälteerzeugung durch elektrisch betriebene Kälteanlagen ist vergleichsweise kostenintensiv und hat die Vereinsbrauerei Greiz (Millhoff (2014)) im Jahr 2014 zu einer Modernisierung ihrer Kälteanlage bewogen, nicht zuletzt auch, weil die alle fünf Stunden wiederkehrende Aufgabe, 260 hl Würze von 96 auf 8°C herunter zu kühlen, die alten Anlagen an ihre Grenzen geführt hat.

„Die beiden (früheren) Bestandsmaschinen benötigten zusammen fünf Stunden, um die durch Kühlung erwärmte Sole wieder auf 4°C herunter zu kühlen, ... (und damit) erforderte die Kälteerzeugung jedes Jahr etwa 240.000 kWh elektrische Energie“, lautet die Erkenntnis über den Verbrauch der alten Anlagen. Der jährliche Bierausstoß betrug 70.000 hl. Die entspricht einer Kühllast elektrisch von 3,43 kWh/hl. Bei einer angenommenen Leistungszahl von 3, hätte die Kälteanlage 10,3 kWh/hl an Kühlleistung abgegeben. Um Würze mit einem Stammwürzegehalt von 12%, einer Dichte zwischen 1,00 und 1,04 kg/l, sowie einer Wärmekapazität zwischen 3,9 und 4,0 kJ/kg K von 99°C auf 0°C abzukühlen benötigt man 11 kWh/hl.

Diese Aussage deute ich so, dass vor der Installation einer neuen Kälteanlage, die Wärme der Ausschlagwürze nicht vollständig zur Erwärmung der Maische genutzt wurde, oder dass der Lagerkeller schlecht isoliert war. Die alten Anlagen „liefen in der ... Vereinsbrauerei zuletzt (jedoch) praktisch unter Volllast, um theoretisch bis zu 420kW Kälte für einen jährlichen Bierausstoß ... bereitzustellen.“ Die jährliche Bierproduktion teilt sich auf 270 Sude á 260 hl auf, lieferten in 5 Stunden je Sud 2.100 kWh an Kälteleistung und für die jährliche Erzeugung insgesamt ca. 570. MWh. Das sind ca. 8,1 kWh je Hektoliter und die Leistungszahl der Anlagen müsste bei ca. 2,36 gelegen haben, was bei alten Anlagen und dem großen Temperaturspektrum der Kühlaufgabe auch ein realistischer Wert ist.

Fazit: in dieser Brauerei haben bei der Auslegung der Prozessschritte vor 40 Jahren die Energiekosten keine Rolle gespielt; 3,43 kWh elektrische Energie je Hektoliter Bier, bei einem derzeitigen Industrie-Strompreis von 0,15 Euro/kWh verteuert das ausgeschenkte „Halbe“ allerdings lediglich um 0,26 Cent.

Seit April 2014 arbeitet eine neue, moderne Kältemaschine anstelle der beiden Alten, und sie benötigt nur „die Hälfte des ursprünglich zur Kälteerzeugung verbrauchten Stroms“. Dies hätte, bei gleicher Kühlaufgabe, nur die Verdopplung der durchschnittlichen Leistungszahl der Kältemaschine von möglichen 2,36 auf ca. 4,7 bedeuten können. Eine ideale (Carnot'sche) Kältemaschine muss bei einer Kältebereitstellung von einer Temperatur bei 5°C (3K als Temperaturdifferenz für den Wärmeübertrager berücksichtigt) die Wärme bei maximal 64°C abgeben. Die reale Anlage muss ihre Wärme folglich bei deutlich tieferer Temperatur an die Umgebung abführen.

Der eigentliche Grund für die Reduzierung des Stromverbrauchs mit der neuen Kälteanlage ist eine grundlegende Veränderung der Aufgabenstellung: „Die Würzekühlung ist zweistufig. Das erste Temperaturniveau der Würzekühlung wird heute in der ersten Stufe eines großen, zweistufigen Wärmeübertragers mit 12 °C kaltem Brunnenwasser erreicht (Anmerkung: daher also die Stromreduzierung!!). Dieses Wasser wird dabei etwa auf 80 °C erhitzt und als Warm-/Heißwasser in der ... Brauerei genutzt. Die Würzetemperatur nach der ersten Abkühlungsstufe beträgt 16 °C. Die zweite Hälfte des großen Würze-Wärmeübertragers kühlt danach die Würze mit der kalten Sole (4 °C) auf die geforderten 8 °C ab (Anmerkung: Anstelltemperatur untergärige Hefe).“ Die nach der Vorkühlung mit Brunnenwasser verbleibende Temperaturabsenkung von 16 auf 8 °C erfordert seitens der Kältemaschine lediglich eine Kältemenge von 0,74 kWh je Hektoliter (bei 70.000 hl Jahresproduktion – 51,5 MWh). Die Kältemaschine gibt die Abwärme an einem Kühlturm über 20 °C warmes Kühlwasser ab, und „kühlt die 5 bis 8 °C warme Sole aus dem Rücklauf auf -4 °C und fördert diese zunächst in den etwa 5 m³ großen Pufferspeicher, von wo aus sie zu den einzelnen Verbrauchern (Anmerkung: z.B. auch in den Gärkeller) gepumpt wird.“

Die „Kältezahl“ (Leistungszahl) der neuen Anlage unter Volllast wird mit 5,2 angegeben „(gemessen mit R717 +12/+6 °C).“

6.1.3. Gegenüberstellung der Verbrauchsdaten im Brauprozess

Aus den Berechnungen der Wärmeverbräuche der einzelnen Teilprozesse vom Maischen bis zum Whirlpool in Kapitel 5 hat sich nach Tabelle 5.6. ein notwendiger Wärmebedarf von 16,1 kWh pro Hektoliter Verkaufsbier ergeben; Maichen 4,1 kWh/hl, Abläutern 5,1 kWh/hl und Kochen 6,9 kWh/hl (für 6% verdampfende Würze). Der Wärmebedarf im idealisierten Wärmerückgewinnungsszenario in Kapitel 6.1 liegt ohne Wärmerückgewinnung bei 15,6 kWh pro Hektoliter Verkaufsbier. Bei dieser Berechnung haben Wärmeverluste an die Umgebung keine Berücksichtigung gefunden, da es hier im Wesentlichen um das Potential zur Wärmebedarfsdeckung der Maische durch die Ausschlagwürze ging. Die Wärmeverschiebung von Ausschlagwürze an die Maische hat zu einer Reduktion des Wärmebedarfs um 10,0 kWh/hl auf einem Restbedarf von 5,6 kWh/hl geführt.

In der Brauerei Rittmayer in Hallerndorf soll dieser Wärmebedarf mit 4,8 kWh pro Hektoliter Verkaufsbier noch unterschritten worden sein. Dies ist plausibel, wenn neben der vollständigen Wärmerückgewinnung im Würzekühler zusätzlich noch die Rückgewinnung der Verdampfungswärme in einem Pfannenkondensator stattfindet, und diese Wärme bei ihrer hohen Temperatur, für die Aufheizung der Würze in der Pfanne bis nahe an den Siedepunkt, genutzt werden kann.

jährliche Bierproduktion	20.000 hl/a		250.000 hl/a	
	Optimum	Durchschnitt	Optimum	Durchschnitt
Wärmeverbrauch im Sudhaus (Maische bis Whirlpool) nach Mayer (Q: Mayer)	18,3 kWh/hl	31,9 kWh/hl	14,3 kWh/hl	25,1 kWh/hl

Tabelle 6.1: Wärmeverbräuche im Sudhaus von Brauereien für kleine und größere jährliche Bierproduktion

Die in der Literatur dargestellten mittleren Wärmeverbrauchswerte liegen überraschend hoch. Zunächst ist es einsichtig, dass Großbrauereien mehr Möglichkeiten zur Investition in Energieeffizienz-Maßnahmen haben als kleine Brauereien, die vielfach noch mit den historischen Anlagen produzieren

werden. Insgesamt liegt jedoch der Wärmeverbrauch im Sudhaus auch den effizientesten Brauereien in der Größenordnung, wie man die ohne Rückführung der Wärme aus dem Würzekühler erwarten würde. Zudem liegt der Durchschnitt der Brauereien bei einem deutlich höheren Wärmeverbrauch. Die Daten von Mayer stammen jedoch aus den Jahren 1992 und davor. Es zeigt jedoch auf welchem Stand der Technik sich die Brauereien vor 25 Jahren befunden haben müssen.

Prozess	2	3	4b	Summe	
Maischen		Abläutern	Kochen		
Wärmebedarf	4,1 kWh/hl	5,1 kWh/hl	6,9 kWh/hl	16,1 kWh/hl	Berechnung der einzelnen Teilprozesse in Kapitel 5
Temp.	78°C	78°C	103°C		
	3,7 kWh/hl	4,7 kWh/hl	7,2 kWh/hl	15,6 kWh/hl	Wärmebedarfe <u>ohne</u> Rückgewinnung im EffizienzSzenario Bild 6.1.
			5,6 kWh/hl	5,6 kWh/hl	Wärmebedarfe <u>mit</u> Rückgewinnung im EffizienzSzenario Bild 6.1.
				4,8 kWh/hl	Brauerei Rittmayer

Tabelle 6.2: Vergleich der in dieser Arbeit berechneten Wärmeverbräuche mit dem angegebenen Verbrauch in einer Niedrig-Energie-Brauerei

Die Verifizierung des Wärmeverbrauchs in der zitierten Niedrig-Energie-Brauerei steht aus, ermutigt jedoch, dass die deutlich tieferen Verbrauchszahlen als die bei Mayer (Q: Mayer) angegebenen möglich sind. Aktuelle Daten für durchschnittliche Brauereien habe ich nicht gefunden.

6.2. Selbstversorgerszenario für Brauereien

Die Versorgung der Brauerei mit Energien, die im Betrieb selber erzeugt wurden, kann zum einen das Ziel haben, den Einkauf elektrischer Energie Antrieb von Elektromotoren und Licht zu reduzieren. Die zweite benötigte Energieform stellt die Wärme dar, die, wie bereits dargelegt bei sehr unterschiedlichen Temperaturen zur Verfügung stehen muss. Nach Einführung von Wärmerückgewinnungs-Technologien besteht im Temperaturbereich niedriger Temperatur, etwa unterhalb von 60°C höchstens noch Bedarf im Bereich Raumheizung für nicht-Produktionsgebäude. Üblicherweise wird Wärme in Erdgas befeuerten Dampfkesselanlagen bereitgestellt und eignet sich damit für den Prozessschritt mit Wärmebedarf bei der höchsten Temperatur im Brauprozess, dem Würzekochen.

Laut Bosch (Q: Bosch) erfordern Teilprozesse im Siedetemperaturbereich von Wasser den Einsatz von Dampf als Wärmeträger, im Temperaturbereich unterhalb des Siedens reicht Heißwasser bzw. mittels Wärmepumpe angehobene Wärme, für Aufgaben im Bereich bis 85°C könnte auch Solarthermie zum Einsatz kommen. Vakuumröhren, die Temperaturen von bis zu 120°C eignen sich potentiell am besten zur Wärmebereitstellung für die Prozesse rund ums Sieden der Würze. Die Begrenzung des Einsatzbereichs für Solarthermie auf Prozesse mit Wärmebedarfen bis maximal 85°C nach Einschätzung der Untersuchung an der Universität Kassel (Uni Kassel), kann darauf hindeuten, dass nur Flachbettkollektoren berücksichtigt wurden, oder die Verlässlichkeit der Solarthermischen Anlagen, Wärme auf hohem Temperaturniveau konstant zu liefern nicht gegeben ist. Damit kommt die Solarthermie keine erstrangige Stellung bei der Prozessversorgung mit Wärme zu. Stattdessen wird sie

nur einen Beitrag leisten können zu Prozessen, bei denen Ersatzsysteme bereitstehen, den Beitrag der Solarthermie jederzeit zu ersetzen.

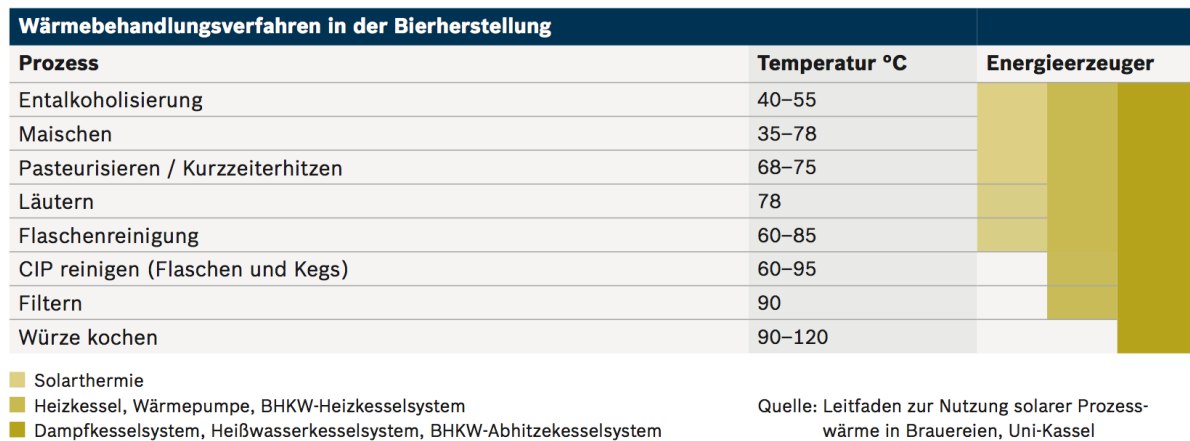


Bild 6.5: Möglichkeiten der Nutzung verschiedener Wärmebereitstellungsoptionen in den verschiedenen Prozessschritten einer Brauerei (Uni Kassel)

6.2.1 BHKW in Brauereien

In Brauereien gibt es mit Pumpen, Verdichtern (bei Einsatz von Kompressionskolbenmaschinen), und Ventilatoren einige Stromverbraucher. Wie groß das Verhältnis von Wärmebedarf zu Strombedarf ist, hängt jedoch hauptsächlich von dem Grad der Wärmerückgewinnung und dem Austausch von Wärme und Kälte zwischen den einzelnen Prozessschritten beim Brauen ab.

Als Wärmekraftmaschine für ein BHKW im Brauereibetrieb eignet sich sicherlich der sehr zuverlässig arbeitende Verbrennungsmotor. Mikrogasturbinen eignen sich eher für einen durchlaufenden Betrieb bei Nennleistung rund um die Uhr. Ein konstantes Lastprofil ist bei Betrieben, die z.T. batchweise produzieren nicht unbedingt optimal. Exotischere KWK-Aggregate wie der Sterlingmotor, der ORC-Prozess oder die Brennstoffzelle haben es sicher schwer in einem eher bodenständigen Industriezweig; Sterlingmotor und ORC-Prozess bieten sich theoretisch eher an, wenn eine niedriger temperierte Wärmequelle vorhanden ist, die im Prozess nicht genutzt werden kann. Dann ist jedoch aufgrund dieser niedrigen Temperatur die Stromausbeute aus jeglichem WKM-Prozess nicht besonders hoch und die Investition in eine solche Anlage ist möglicherweise nicht gerechtfertigt. Dies jedoch zu entscheiden, erfordert eine Analyse der Wärmequelle im Einzelfall.

Der Bundesverband für KWK e.V. (Bundesverband KWK (2011)) gibt an, dass Verbrennungsmotoren in den für die meisten Industriebetriebe relevanten Leistungsklassen verfügbar. Viele moderne BHKW sind auf hohe elektrische Wirkungsgrade optimiert und standardmäßig für eine Auskopplung der Motor-Abwärme als Niedertemperaturwärme mit bis zu 90°C ausgelegt. BHKW können jedoch auch mit zweistufiger Wärmeauskopplung ausgerüstet werden, und liefern entsprechend Bild 3.4 Wärme bei einem niedrigeren Temperaturniveau von 75–85°C aus dem Motorkühlwasser sowie Wärme auf höherem Temperaturniveau von bis zu 280°C aus dem Motorenabgas, wenn das wärmeaufnehmende Medium über den Kühlwassertauscher bereits vorerhitzt wird. Etwa ein Drittel der gesamten KWK-

Wärme fällt im Abgas an und eignet sich so zur Dampfproduktion. Einige Hersteller bieten laut Bundesverband KWK auch „heißgekühlte Motoren“ an, die Heizwassertemperaturen aus dem Kühlkreislauf des Motors von bis ca. 120°C zur Verfügung stellen können. Damit steht ein größerer Anteil der Wärme aus dem BHKW auf ausreichend hohem Temperaturniveau zur Verfügung um sich für den Antrieb von Absorptionskältemaschinen zu eignen.

BHKW werden oft modular eingesetzt. Mehrere Module werden parallel betrieben, sodass die einzelnen Einheiten in der Regel im Auslegungszustand (nahe Volllast) arbeiten können. Eine hohe Verfügbarkeit, bei Ausfall eines einzelnen Moduls bleibt gewährleistet. Der Betrieb von Gasmotoren mit biogenen Brennstoffen wie Klär- und Biogas, ermöglicht dem Umstieg auf eine erneuerbare Energieversorgung.



Dampferzeuger im Abgasstrom hinter BHKW



Absorptionskältemaschine, Kälteleistung 500 kW bei einer Verdampfungstemperatur von -13 °C, Antrieb über heißgekühltes BHKW mit 120 °C

Bild 6.3: BHKW mit Dampferzeuger für Wärmebedarf z.B. beim Kochen und Verdampfen der Würze (Bundesverband KWK (2011))

Bild 6.4: Thermisch von einem BHKW mit heißer Motorkühlung (120°C) angetriebene Kältemaschine (Kältemittel NH₃) z.B. für Solekühlung (-4°C) bei -13°C Verdampfer-temperatur geeignet (Bundesverband KWK (2011))

6.2.2. Wärmepumpen

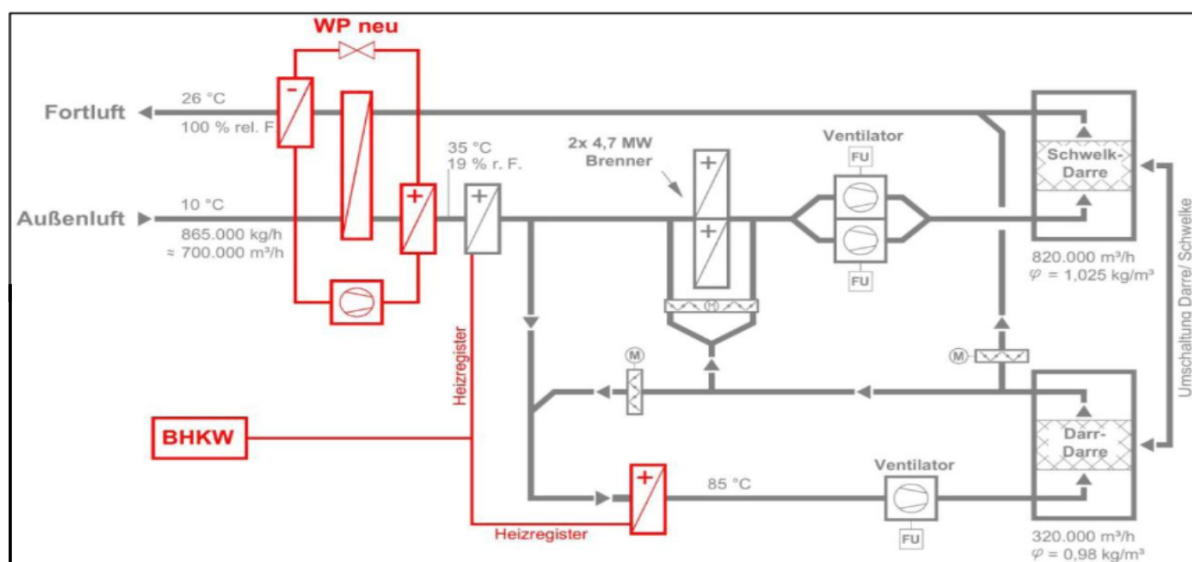
Mit Hilfe von Wärmepumpen können auch solche Wärmequellen erschlossen werden, deren Temperaturniveau erst angehoben werden muss, bevor die Wärme beim Verbraucher genutzt werden kann. Mit der Aufwertung der Wärmequelle ist notwendigerweise der Einsatz höherwertiger Energie notwendig, wie wir bereits im Kapitel 3 über die Kälteerzeugung gesehen haben. Überschüssige Wärme aus dem Brauprozess steht nach meiner Analyse in Kapitel 6.1., mit der Zuheizung für den Prozess des Würze Kochens und Verdampfens, auf höherem Temperaturniveau, nahe der

Siedetemperatur zur Verfügung. Wärmepumpen können jedoch bei dem recht hohen Energieaufwand beim Trocknen des Malzes eingesetzt werden, da hier die Wärme der über das Darrgut strömenden Luft zu einem guten Teil in der Fortluft verbleibt und unbedingt zurückgewonnen werden sollte. Dieser Prozess ist als Einsatzbeispiel von BHKW und Wärmepumpe im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

6.2.3. Einsatzbeispiel BHKW und Wärmepumpe beim Trocknen der Darren des Malzes mit Warmluft

Einsatzmöglichkeit eines BHKW zur Strom- und Wärmeversorgung (Hochtemperatur) sowie einer Wärmepumpe zur Unterstützung einer Wärmerückgewinnung (Niedertemperaturversorgung) aus der Literatur (Wolf (2014), Mönch (2011))

In einer Untersuchung von Wolf und Mönch (Wolf (2014), Mönch (2011)) (s. Bild 5.1) wird der Einsatz eines BHKW zur effizienten Primärenergieausnutzung und Nutzung der Wärme in Heizregistern bei der Erwärmung von Außenluft auf 85°C für den Bereich der Darr-Darre eingesetzt. Im Bereich der Abluft aus dem Trocknungsprozess wird eine Wärmepumpe genutzt, welche die Wärme aus der Fortluft der Schwelk-Darre im Verdampfer des Kältekreislaufs aufnimmt und im Kondensator des Kreislaufes zur Erwärmung der Außenluft bei höherer Temperatur wieder abgibt. Damit übernimmt die Wärmepumpe einen Teil der Heizaufgabe des BHKW im tieferen Temperaturbereich, was die Effizienz der Gesamtanlage steigert, da die Wärme aus dem Wärme-Kraft-Prozess des BHKW mit seiner vergleichsweise hohen Temperatur nicht für die erste Anhebung der Temperatur der recht kalten Außenluft bei 10°C eingesetzt werden muss, sondern stattdessen bereits relativ kühle Fortluftwärme über die „Veredelung“ mit der Wärmepumpe diese Aufgabe übernehmen kann.



/Mönch 2011/ Mönch, D.: Verbesserung der Energieeffizienz in der Mälzerei. In: Brauwelt (2011), 1-2, S. 1556-1558
/Wolf et al. 2014/ Wolf, S.; Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A.; Jakobs, R.: Analyse des Potenzials von Industrierärmepumpen in Deutschland: Forschungsbericht. FKZ 0327514A. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) (Hrsg.). Stuttgart, 2014

Bild 5.1: Wärmerückgewinnung mittels Wärmepumpe sowie Eigenerzeugung durch KWK (BHKW) im Darrprozess einer Mälzerei

Der Darrprozess lässt sich, wie in [Bild 5.1](#) dargestellt, durch Wärmerückgewinnung der Fortluft des Schwelkprozesses, unter Zuhilfenahme einer Wärmepumpe, gestalten.

6.2.4. Erzeugung von Biogas aus Treberrückständen des Brauprozesses

Im Brauprozess fallen große Mengen an biologischen Abfallstoffen an, die entweder als Viehfutter Verwendung finden können (insb. Malztreber) oder neben der Verbrennung auch zur Biogasproduktion.

Die Tendenz Frischwasser aus ökonomischen Gründen einzusparen hat die Konzentration der organischen Bestandteile im Brauereiabwasser ansteigen lassen (Römpf Thieme). Brauereiabwässer eignen sich aufgrund ihrer Zusammensetzung sehr gut für biologische Abwasserbehandlung. Einige Brauereien haben für ein modernes Abwassermanagement betriebseigene biologische Abwasservorbehandlungsstufen installiert (Römpf Thieme). Kombinationen von anaerober und aerober Abwasserbehandlung sollen dabei die Menge an Überschussschlamm um 75% gegenüber rein aerober Behandlung reduzieren. Insgesamt werden die Anteile mit Chemischem-Sauerstoffbedarf im Abwasser um ca. 80% reduziert und in Biogas umgewandelt. Hier liegt ein Potential, selbst erzeugtes Biogas in einem Kessel zur Wärmeerzeugung oder besser in einem BHKW zur Strom- und Wärmeversorgung zu nutzen. (Ahrens (2008), Beers (2010), Kiechle (2010)).

Aus 1 t Nasstreber (mit Wassergehalt <80%) soll laut Römpf-Thieme (Römpf Thieme) 1,4 t Dampf (entsprechend 1 MWh thermischer Energie) erzeugt werden können. Es wird angegeben, dass dies bis zu 90% des Primärenergiebedarfs in der Brauerei bereitstellt; Nicht ganz klar ist, welcher Anteil des Nasstrebers dabei für die Erzeugung von Biogas und welcher für die Verbrennung angesetzt wird, und ob das Biogas im Kessel nur der Dampferzeugung allein dient, oder ob die energetisch aufwertende Nutzung in einem BHKW zu dem hohen, angegebenen Energiedeckungsgrad führt.

Die in [Tabelle 6.1](#) angegebenen Mengen für (Malz-)Treber, bei einer typischen Zugabe von 17 kg Malz je Hektoliter Bier lassen den Schluss zu, dass nach der Aufnahme der Extrakte in der Würze, die Trebermasse nunmehr „nass“ bestimmt wurde, und deshalb in genau der gleichen Größenordnung liegt, wie das der Maische zugegebene Malz.

wiederverwertbare Nebenprodukte	
Treber	16–19 kg/hL
Hefe/Geläger	1,7–2,9 kg/hL
Kieselgur	0,4–0,7 kg/hL

Tabelle 6.1: Rohstoffanfall für Europäische Brauereien je hl Verkaufsbier (Q: roempf)

6.3. Implementierungshindernisse

Im Rahmen dieser Arbeit habe ich Kontakt zu Köln ältester Kölsch-Brauerei aufgenommen und an zwei Brauereibesichtigungen teilgenommen, sowie im Anschluss in einem Einzelgespräch Erkenntnisse aus der Brauereipraxis erhalten können. Die Brauerei Sünner ist nicht, wie einige Großbrauereien auf maximale Sudausbeute je Kalendertag ausgelegt; Nur an den Tagen von Montag bis Donnerstag werden zwei Sude am Tag aufgesetzt, die Belegschaft „fährt“ also nur eine Schicht. Freitag ist Reinigungstag und am Wochenende steht der Betrieb. Ein Gebäude, in dem sich die Brennerei befindet ist denkmalgeschützt und darf daher keine Klimaanlage installieren; man Brennt den Schnaps dann halt nur im Winterhalbjahr, wenn die Temperatur im Gebäude deutlich unter 20°C fällt.

Das Sudhaus mit seinen schönen alten, kupfernen Maisch- und Läuterbottichen steht mehrmals wöchentlich Besuchern bei Führungen offen. Die offenen Stahlwannen für die Gärung liegen im 6 bis 8 Meter tief gelegenen Keller. Die Reifung findet im nochmals spürbar kälteren Nebenraum in riesigen, liegenden Stahltanks statt. Die Kellerlage bietet für die kalten Prozessschritte beste Voraussetzungen, da nach der Kühlung der Würze die Kühlleistung im Gärkeller hauptsächlich durch die notwendigen Luftwechsel entsteht, im Lagerkeller jedoch hauptsächlich durch die Aufrechterhaltung der Lagertemperatur von ca. 0°C gegenüber den Kellerwänden.

Wie die Brauerei Sünner gibt es unter den vielen hunderten kleineren Brauereien sicher viele, die eine ähnliche Firmenphilosophie haben. Die Brauerei lebt von der Tradition, ist stolz in ihrem Kreis, ihrer Stadt oder ihrem Viertel seit vielen Jahrzehnten oder sogar Jahrhunderten zu produzieren, und im lokalen Umfeld treue Kunden ihres Bieres zu finden. Zur Traditionspflege gehört es, dass das Hauptprodukt seit Jahrzehnten den altbekannten, verlässlichen Geschmack hat, dass die Bottiche des penibel sauber gehaltenen Sudhauses sowie der Gär- und Lagerkeller den Charme der alten Braukunst versprühen. Die Optimierung der Kostenstruktur wird nicht unbedingt im Prozess gesucht. Gutes Marketing, sowie ein repräsentativer Ausschank im eigenen Hause sind für das Fortbestehen des Familienbetriebs wichtiger, als die Effizienz der Technik zu optimieren. Letztlich ist man auf das know-how externer Firmen angewiesen, wenn man sich energie- und verfahrenstechnisch modernisieren will. Die Frage, ob sich durch die Veränderungen am Prozess der Geschmack bzw. die Qualität des Bieres ändern wird, kann ihnen keiner beantworten.

Die den höchsten Preisanteil der Energie an den Produktionskosten, hat der Anlagenlieferant Bosch mit bis zu 10% angegeben, was knapp 5 Euro pro Hektolitern Verkaufsbier entsprechen soll. Dass sind pro Halbliterflasche Bier 2,5 Cent. Neben den Rohstoffen, von denen das Malz, neben dem Frischwasser, mit großem Abstand zu Hopfen und Hefe den größten Masseanteil darstellt, und damit auch den Rohstoffpreis für das Bierbrauen treibt, besteht der Prozess des Bierbrauens neben detaillierter Sachkunde des Braumeisters im Wesentlichen aus der Zufuhr und dem Entzug von Energie.

Die Verbesserung der Effizienz der einzelnen Prozessschritte wird sicher skeptisch betrachtet, wenn die Maische, die Würze oder das Jungbier einen verfahrenstechnisch anderen Prozess als vorher durchläuft. Veränderungen an den Transportwegen von Wärme und Kälte, oder die Bereitstellung von Elektrizität und Wärme aus einem BHKW oder ggf. einer Absorptionskältemaschine anstelle einer Kompressionskältemaschine dürfen wahrscheinlich eher vorgenommen werden, wenn die installierende Firma dafür nicht an den zentralen Anlagen für den Brauprozess „ran“ muss.

Mit neuen Technologien wie thermischen Kälteanlagen und Wärmepumpen verlässt der Prozessexperte im Hause, der Braumeister ihm bekanntes Gebiet. Insbesondere in kleineren

Brauereien wird er aber wahrscheinlich der einzige Techniker im Hause sein. Entsprechend kann eine Scheu bestehen, bei einer Produktionsstörung auf die schnelle Hilfe des externen Energietechnikers angewiesen zu sein.

Es gibt sicher viele nicht in der Technik und der Logik der Energieeffizienz liegende Gründe, warum die Brauereien einen sehr unterschiedlichen Stand hinsichtlich ihres spezifischen Energieverbrauchs haben. Ein weiterer Grund kann sein, dass viele Brauereien gar keine Möglichkeit besitzen, durch Messungen herauszufinden, in welchem Teil der Prozesskette, oder gar welchem Bereich der Brauerei wie viel Energie verbraucht wird, und was für ein Verbrauch in welchem Teilprozess verfahrensbedingt notwendig ist, und wo die Ineffizienz des Prozesses beginnt.

7 Rückschau und Ausblick

7.1. Zusammenfassung

Ansatz der vorliegenden Arbeit ist es, mit Blick auf den in einer großen Variationsbreite existierenden Brauprozess in Brauereien mit unterschiedlichster jährlicher Produktionsmenge und technologischem Stand, die wesentlichen charakteristischen Teilprozessschritte hinsichtlich Ihrer Bedarfe an den thermischen Energieformen Wärme und Kälte, unter Berücksichtigung der jeweils in den Teilprozessen herrschenden Temperaturniveaus, darzustellen. Dies ist in Kapitel 2 sowohl für die in Trocknungsprozessen vorbehandelten feststofflichen Braukomponente Gerstenmalz und Hopfen, sowie für die mit dem Beginn der Erwärmung von frischem Brauwasser startenden Prozesse des Einmaischens, Läuterns, Kochens, Gärens bis hin zur Reifung des Jungbieres, erfolgt. Zunächst wurde das jeweilige Temperaturniveau der einzelnen Phasen des Brauvorgangs, trotz seiner unterschiedlichen verfahrenstechnischen Realisierung, abgesteckt. In Kapitel 5 wird der rein für den Prozess notwendige Wärme- und Kältebedarf, auf der Basis der wesentlichen Zustandsänderungen des entstehenden Produktes, bestimmt. Dabei liegt bei jedem Prozessschritt entweder ein Wärme- oder ein Kältebedarf vor. Die Teilprozesse bilden eine zeitliche Abfolge innerhalb des Brauprozesses, welche die Vorstufen des Bieres nacheinander durchläuft. Die in den Kapiteln 3 zum Thema Kälte und in Kapitel 4 zum Thema Wärme dargestellten Grundlagen, liefern die Grundlagen für das Verständnis, des Verhaltens eines Systems im Umfeld von thermischer Energie und bilden die thermodynamischen Kenntnisse, die für die Beurteilung des Transportes, der Erzeugung und der Speicherung von Wärme und Kälte ergeben. Die Wärme und Kältebedarfe in ihrer zeitlichen Abfolge ermöglichen uns unabhängig von gängigen technischen Realisierungen in der Praxis noch einmal in Kapitel 6 die Frage zu stellen, in wie weit zunächst für jeden einzelnen Teilprozess Energieeffizienzverbesserungen durch Eingriff in den Prozess möglich sind. Die Frage der Heranführung der Wärme bei Wärmebedarf des Produktes an das Produkt hat in der Entwicklung der Brauereitechnologie sehr verschiedenen konstruktiven Ausführungen der Maischgefäße und der Gefäße für die Würzebehandlung geführt. An dieser Stelle ist der Einfluss von Veränderungen, welche den Transport von Wärme verbessern könnten, auch auf das Produkt zu hinterfragen. Die modernen Ausführungen der Maisch- und Würzepfannen sind auf ein produktschonendes Verfahren ausgelegt. Änderungen im Anlagenpark erfordern von jeder Brauerei einen langerprobten Umgang, um trotz der Veränderungen an diesen Prozesshilfsmitteln, dennoch die geschmackliche Qualität des Bieres nicht unerwünscht zu beeinflussen. Die Rückführung der Verdampfungswärme beim Kochen und teilweise Verdampfen der Würze in der Pfanne, in den Prozess, unter Beibehaltung des höchstmöglichen Temperaturniveaus dieser Wärme, ist ein Beispiel aus Kapitel 6 für die Effizienzsteigerung des Teilprozesses. Stärker in den produktbeeinflussenden Teilprozess des Maischens greift die Wahl zwischen den zwei etablierten Wärmezufuhrverfahren, dem traditionellen Dekoktionsverfahren und dem in letzter Zeit deutlich überwiegenden Infusionsverfahren. Hier liegt mit der Wahl des letzteren Verfahrens, innerhalb des Teilprozesses Maischen ein Effizienzsteigerungspotential in der Praxis.

Die teilprozessübergreifende Kopplung der einzelnen Verfahrensschritte erlaubt den Transport von Wärme und Kälte, zwischen diesen Teilprozessen, unter Berücksichtigung der zeitlichen Versetzung der einzelnen Teilprozesse. Damit lassen sich Wärme- und Kältebedarfe untereinander bedienen, wenn eine Speichervorrichtung für Wärme auf den jeweiligen Temperaturniveaus vorhanden ist. Das Temperaturniveau der thermischen Energien ist, wie bereits in der Theorie in den Kapitel 3 und 4 gesehen, von großer Bedeutung. Denn es geht bei der Steigerung der Energieeffizienz des Gesamtprozesses um die Erhaltung des Potentials der Wärme und Kälte trotz naturbedingter Einbußen, welche die Übertragung der Wärme aufgrund eines notwendigen Temperaturgefälles mit sich bringt. Die Kopplung der Teilprozesse entlang des Brauprozesses führt nach der Analyse in Kapitel 6 dazu, dass Energiezufuhr von außen am heißesten Ort entlang der Prozesskette erforderlich ist, da an dieser Stelle des Würzekochens und Verdampfens innerhalb des Gesamtprozesses keine Wärme auf diesem Temperaturniveau „ausgeliehen“ werden kann. Als Resultat erhält man, dass eine Dampferzeugung zur Wärmebereitstellung mit einer Temperatur oberhalb der Siedetemperatur von

100°C erforderlich ist, sowie Kältebereitstellung für die kühlen Prozessschritte Gären und Reifen, bei denen die Aufrechterhaltung einer Temperatur bei knapp 0°C gegenüber der wärmeren Umgebung über eine längere Zeitdauer erforderlich ist.

Hiermit kommt man zu der zweiten Fragestellung aus der Einleitung, welche Szenarien der Bereitstellung der Energie, ggf. in Form einer Selbstversorgung der Brauerei sinnvoll ist.

Energetisch ist die Erzeugung von Wärme auf einem vergleichsweise moderaten Temperaturniveau von benötigten 120 bis 140°C durch die Verbrennung des Primärenergieträgers Erdgas im Dampferzeuger nicht optimal. Es bietet sich an, das Gas bei der Verbrennung einen guten Teil seiner Exergie in Reinform zur Verfügung stellen zu können, in dem es z.B. in einem Gasmotor mechanische Arbeit leisten darf, die über einen Generator zu elektrischem Strom veredelt wird, und die Wärmebedarfe in der Brauerei aus dem Abgas und dem Kühlwasser des Motors gedeckt werden. Diese Form des gasbetriebenen Blockheizkraftwerkes (BHKW) ist in der Industrie seit einiger Zeit weit verbreitet. Der Strom deckt Bedarfe durch Elektromotorenantriebe, Kälteerzeugung mit Kompressions-Kältemaschinen, Lüftungsventilatoren, Pumpen und Beleuchtung. Überschüssiger Strom kann ggf. an den Stromversorger verkauft werden.

Der Wärmebedarf für den Brauprozess, sowie für die Wärme im Flaschen- und Fassreinigungsprozess, sowie zur Pasteurisierung des Bier (bei Rückgewinnung eines Teils der Wärme auf leicht niedrigerem Temperaturniveau) wird durch eine Wärmebedarfsauslegung des BHKW weitestgehend gedeckt. In der Ausführung des BHKW sollte berücksichtigt sein, dass die Wärme in ausreichender Menge bei höherer Temperatur durch optimale Nutzung des heißen Abgases entnommen wird, um auf jeden Fall den Dampfbedarf in der Würzpfanne zu decken.

7.2. Forschungsbedarf

7.2.1. Weiterzuführende Untersuchungen

Es ist sicher wünschenswert Untersuchungen und Messungen an konkreten Brauerei-Anlagen vorzunehmen und dabei sowohl die Unterschiede verschiedener konstruktiver Ausführung desselben Teilprozesses, unter ansonsten möglichst gleichen Bedingungen, hinsichtlich der Energieverbräuche zu untersuchen, wie auch den Effekt, den unterschiedliche Einsatzbedingungen bei ansonsten gleichen Teilprozessausführungen auf den Energieaufwand haben. Dies hilft im Wesentlichen Herstellern, ggf. auch die energiesparsamsten Entwicklungen beim Anlagendesign zu erkennen, und die Auswahl der Anlagen für den jeweiligen Einsatz in einer Brauerei auch energetisch günstig zu treffen.

Der Einsatz von „exotischen“ energietechnischen Lösungen, wie Absorptionskälteanlagen und Wärmepumpen sollte weiter untersucht werden. Es ist bei ersterer erforderlich, dass Wärme auf ausreichend hohem Temperaturniveau von mindestens 80°C, besser 100 oder 120 °C, der Anlage als Antriebsenergie kontinuierlich zur Verfügung gestellt werden kann. Diese Wärme sollte nicht anderweitig nutzbare Abwärme sein, und nicht erst speziell für ihren Einsatz in der Kältemaschine erzeugt werden. Die Einbeziehung der Flaschenreinigung und Pasteurisierung des Biers in die Wärmebedarfsbilanz für die Brauerei, sowie ggf. eine hauseigene Mälzerei wird Aufschluss darüber geben, ob Wärmeüberschuss oder eher ein Mangel in diesem Mittleren Temperaturniveau von ca. 100°C herrscht. Bei einem Mangel, bei gleichzeitigem Überangebot von Wärme auf einem Niveau von 30 bis 60°C ist zu prüfen, ob sich der Einsatz einer Wärmepumpe lohnt, diese Niedertemperaturwärme durch Anhebung auf ein höheres Niveau einer Nutzung zuzuführen. Die Größe der Brauerei stellt bei der Investition insbesondere in Absorptionskältemaschinen sicher eine Rolle, da diese sich im größeren Maßstab eher rentieren, aufgrund vergleichsweise hoher Anschaffungskosten im Vergleich zu Kompressionskältemaschinen gleicher Kühlleistung.

Auf die Kältetechnik auf der Ebene der Anlagen- und Apparatechnik konnte in dieser Arbeit nicht eingegangen werden. Erfahrungen in der Versorgungstechnik, den Möglichkeiten und Grenzen von Wärmeübertragern sowie regelungstechnische Erfahrungen mit diesen Anlagen sind hierfür nötig.

Als Beispiel für das Zusammenwirken von BHKW und Wärmepumpe wird deren gemeinsamer Einsatz beim Darrprozess in der Mälzerei in Kapitel 6 gegeben.

Der Einsatz von erneuerbaren Energien, wie die Nutzung von hausintern aus Treberabfall hergestelltem Biogas, kann für größere Betriebe interessant sein. Solarthermie ist, wie in einem Beispiel in Kapitel 6 dargestellt, zur Unterstützung der Wärmebereitstellung im mittleren Temperaturbereich bis 100°C eine Option.

7.2.2. Gesamtbilanz – Ökobilanz

Im Rahmen einer Gesamtbilanz entlang der gesamten Lebenszykluskette der Produktion der Gerste und des Hopfens, der Wasseraufbereitungsverfahren für das Brauwasser, bis hin zur Frage in welchen Gebindeformen die Vermarktung des Bieres das Getränk am umweltneutralsten seinen Abnehmer findet, kann ein Thema für die Brauerei der Zukunft sein. Die landesweite Belieferung in hausintern abgefüllten Glasflaschen führt zu der Frage nach der den Transportkosten.

Insgesamt kann man argumentieren, dass erst die Analyse des Lebenszyklus, auch im Hinblick auf den „footprint“ der neu zu installierenden Anlagen, einen Eindruck davon vermitteln kann, ob Energieeffizienzverbesserungen entlang der Prozesskette in der Brauerei, aus Sicht der Nachhaltigkeit, die höchste Priorität verdient.

Literaturverzeichnis

Kapitel 2:

Privatbrauerei Gaffel Becker & Co OHG (2017); www.gaffel.de

Walzl, M.; Hlatky, M. (2014): Jungbrunnen Bier. 4. Auflage. Verlagshaus der Ärzte GmbH, Wien, S.124; <https://roempp.thieme.de/include/images/r300/RI-159-0970.gif>

Kunze, W. (2016): Technologie Brauer und Mälzer. 11. Auflage, VLB Berlin

Krause, U. (2017): Der Hobbybrauer-Versand; www.Brauversand.de

Thieme RÖMPP (2016); www.roempp.thieme.de

Deutscher Brauer Bund e.V. (2017); www.brauer-bund.de

Kapitel 3:

Drees, H., Zwicker, A., Neumann, L. (1992): Kühlanlagen. 15., bearbeitete Auflage, Verlag Technik GmbH Berlin

Mann, G., Hofer, B. (1977): Kühlraumlastfaktoren (Reihe Luft- und Kältetechnik). Berlin: Verlag Technik

Breidert, H.-J. (2009): Projektierung von Kälteanlagen – Berechnung, Auslegung, Beispiele. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, C.F. Müller Verlag, Heidelberg

ILKA-Berechnungskatalog, Teil Kältetechnik. Hrsg. vom Ingenieurbetrieb Luft- und Kältetechnik Dresden

Kunis, J. (1982): Grundlagen der Gefrierkonservierung von Feinback- und Konditoreiwaren. Kammer der Technik, FV Lebensmittel

Kunis, J. (1983): Entwicklungstendenzen der Kältebehandlung von Lebensmitteln. Luft- und Kältetechnik 19, H. 2, S. 63-67

Glysofor Wärmeübertragungs- und Kühlmittel für die Lebensmittelindustrie (2017); www.glysofor.de

Balzereit, F. (1999). Bestimmung von axialen Dispersionskoeffizienten in Wärmeübertragern aus Verweilzeitmessungen, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 19 Nr. 120. Düsseldorf: VDI Verlag

Kunze, W.: Technologie Brauer und Mälzer. 11. Auflage, VLB Berlin, 2016

Millhoff, H. (2014): Moderne Ammoniakkälte für Traditionsbrauerei – Für gutes Bier. DIE KÄLTE + Klimatechnik, 10/2014

www.heureka-stories.de

BHKW-Infozentrum GbR

Kapitel 4:

Schmitz, K.W., Schaumann, G. (2005): Kraft-Wärme-Kopplung, Springer Verlag, 3. vollst. überarbeitete Auflage

Suttor, W. (2014): Blockheizkraftwerke. Ein Leitfaden für den Anwender, BINE-Informationdienst, FIZ Karlsruhe, Fraunhofer IRB Verlag, 8. überarb. Auflage

Kunze, W. (2016): Technologie Brauer und Mälzer. 11. Auflage, VLB Berlin

www.energie-lexikon.info/kraft_waerme_kopplung.html?banner=KWK

SOKRATHERM GmbH - Energie- und Wärmetechnik; www.sokratherm.de

Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. (2011): KWK für die Industrie – Zurück in die Zukunft

Kapitel 5:

Kunze, W. (2016): Technologie Brauer und Mälzer. 11. Auflage, VLB Berlin

Seidel, M. (2017): Thermodynamik – Verstehen durch Üben. Band 2: Wärmeübertragung, De Gruyter, Oldenbourg

Krottenthaler, M.(2007): Entwicklung innovativer Technologien zur Optimierung der Würze- und Bierqualität. Habilitationsschrift vorgelegt beim Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

Bosch Thermotechnik GmbH (2015): Thermische Großanlagen und Systemlösungen für Brauereien.

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung; www.pik-potsdam.de

Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K. (2012): Leitfaden zur Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien. Universität Kassel, Institut für thermische Energietechnik

Hackensellner, T, Bühler, T. (2008): Effizienter Energieeinsatz im Sudhaus. Kitzingen

Brewers of Europe; www.bvt.umweltbundesamt.de/archiv-e/food_drink_milk.pdf

Brewers of Europe (2012): The Environmental Performance of the European Brewing Sector.

Schu, G.F. (1994): Brauwelt (Brwlt) 19, S. 881-890

Herwig, H. (2000): Wärmeübertragung A-Z - Systematische und ausführliche Erläuterungen wichtiger Größen und Konzepte, Springer, VDI-Verlag, Berlin, Düsseldorf

Heidemann, W. (2016): Technische Thermodynamik. Wiley-VCH Verlag

BauWissen Online (2017) bauwion.de

Kapitel 6:

Brücklmeier, J. (2015): Berechnungen in der Brauerei. brau!technik

Manger, H.-J. (2006): Kälteanlagen in der Brau- und Malzindustrie. VLB-Fachbücher

Back, W. (Hrsg.) (2008): Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie. 2. Akt. Auflage, Fachverlag Hans Karl

Mönch, D. (2011): Verbesserung der Energieeffizienz in der Molkerei. Brauwelt, 1-2, S. 1556-1558

Millhoff, H. (2014): Moderne Ammoniakkälte für Traditionsbrauerei – Für gutes Bier. DIE KÄLTE + Klimatechnik, 10/2014

Wolf, S. (2014): Energetische Selbstständigkeit von Industrie von Industriebetrieben mit Best-Practice Beispielen aus Deutschland. Universität Stuttgart

Mayer, A. F. (1992, 1996): Brauwelt (Brwlt) 14, S. 616-622, 1992 und Brwlt 46, S. 2427-2432, 1992 und Brwlt-Brevier, S. 371-394, 1996

Krones/ Steinecker EquiTherm: Thermische Energie im Brauprozess recyceln.

Universität Kassel: Leitfaden zur Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien.

Roempp-Thieme: www.Brauerei_roempp.thieme.de

Ahrens, A. (2008): wwt-Wasserwirtschaft Wassertechnik, Nr 9, 20-23

Beers, A. (2010): gwf Wasser, Abwasser, 151, 143-145

Kiechle, C. (2010): gwf Wasser, Abwasser, 151, 146-149

Single, J., Michel, R., Bonfig, K. (2014): Brauwelt, 154, 603-607

Pfister, S.; www.niedrig-energie-brauerei.de

EnEff:Industrie: Mit solarer Wärme Bier brauen; www.eneff-industrie.info